

CENTRO PAULA SOUZA

FATEC SANTO ANDRÉ

Tecnologia em Eletrônica Automobilística

João Victor Golino Vital

Noemi Ladislau Lima da Costa

Rodrigo Soares de Azevedo

ESTUDO ALTERNATIVAS DE PROPULSÃO SUSTENTÁVEL:

Viabilidade em Veículos Extrapesados

Santo André

2025

João Victor Golino Vital
Noemi Ladislau Lima da Costa
Rodrigo Soares de Azevedo

ESTUDO ALTERNATIVAS DE PROPULSÃO SUSTENTÁVEL:
Viabilidade em Veículos Extrapesados

Trabalho de Conclusão de Curso entregue
à FATEC Santo André, como requisito
parcial para obtenção do título de
Tecnólogo em Eletrônica Automobilística.

Prof.º Orientador: Me. Cleber William
Gomes

Santo André
2025

V836e

Vital, João Victor Golino

Estudo alternativas de propulsão sustentável: viabilidade em veículos extrapesados / João Victor Golino Vital, Noemi Ladislau Lima da Costa, Rodrigo Soares de Azevedo. - Santo André, 2025. – 306f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2025.

Orientador: Prof. Me. Cleber Willian Gomes

1. Eletrônica. 2. Veículos Pesados. 3. Propulsão sustentável. 4. Veículos rodoviários. 5. Tecnologia. 6. Veículos Agrícolas. 7. Veículos de mineração. 8. Sustentabilidade. I. Costa, Noemi Ladislau Lima da. II. Azevedo, Rodrigo Soares de. III. Estudo alternativas de propulsão sustentável: viabilidade em veículos extrapesados.

629.2

LISTA DE PRESENÇA

Santo André, 26 de junho de 2025.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA: “ESTUDO
ALTERNATIVAS DE PROPULSÃO SUSTENTÁVEL” DOS ALUNOS DO 6º
SEMESTRE DESTA U.E.

BANCA

PRESIDENTE:

PROF. CLEBER WILLIAN GOMES

MEMBROS:

PROF. FERNANDO GARUP DALBO

PROF. ROBERTO BORTOLUSSI

ALUNOS:

JOAO VICTOR GOLINO VITAL

NOEMÍ LADISLAU LIMA DA COSTA

RODRIGO SOARES DE AZEVEDO

Dedicamos este trabalho aos
nossos familiares, que nos
apoiam ao longo de todo o
curso.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a nossos familiares, amigos, professores e todos aqueles que de forma direta ou indireta nos apoiaram ao longo do curso e contribuíram para a conclusão deste trabalho. E um agradecimento em especial ao nosso professor orientador Cleber William Gomes pela disponibilidade e atenção no desenvolvimento do trabalho.

“Sonhos determinam o que você quer. Ações determinam o que você conquista.”

Aldo Novak

RESUMO

Atualmente temos uma convergência global por um progresso geral para uma melhor qualidade de vida e uso consciente dos recursos naturais, e podemos ver expressivas mudanças no setor automotivo, mas principalmente em veículos de passeio havendo um menor volume de publicação em relação a veículos pesados, portanto neste trabalho foi feito um estudo de viabilidade com alternativas de propulsão sustentável para esta divisão automobilística. Como primeiro passo para este trabalho acadêmico iniciamos entendendo a evolução tecnológica geral dos veículos pesados passando por suas primeiras versões puramente diesel e toda sua transformação ao que conhecemos hoje motivada pelas normas de fiscalização sempre mais exigentes e rigorosas. Após um panorama geral do mercado e base histórica escolhemos três segmentos econômicos sendo eles os setores rodoviário, agrícola e de mineração, separando um capítulo para cada, analisando minuciosamente as melhores soluções tecnológicas aplicáveis por segmento. Através do estudo e análise de alternativas em cada setor foi discutido entre o grupo somado a experiência técnica do professor orientador abordando as evidências de pesquisa e apontando qual a melhor escolha para cada segmento do ponto de vista técnico e econômico.

Palavras-Chave: Veículos Pesados. Rodoviário. Agrícola. Mineração. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Currently there is a global convergence towards general progress for a better quality of life and the conscious use of natural resources, and we can see significant changes in the automotive sector, but mainly in passenger vehicles to heavy duty vehicles there is much less information published therefore this paper carried out a feasibility study with sustainable propulsion alternatives for this automotive division. As a first step in this academic document, we began by understanding the general technological evolution of heavy-duty vehicles, going through their first purely diesel versions and all their transformation to what we know today, motivated by inspection standards always more demanding and rigorous. After a general overview of the market and historical basis, we chose three economic segments: the road, agricultural and mining sectors, separating a chapter for each, analyzing in detail the best technological solutions applicable to each segment. Through the study and analysis of alternatives in each sector, the group discussed added to technical experience of the supervising professor, addressing the research evidence and pointing out the best choice for each segment from a technical and economic point of view.

Keywords: Heavy-duty Vehicles. Road. Agricultural. Mining. Sustainable.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Análise Mercado Mundial de Veículos Pesados | 25 |
| Figura 2 – Primeiro Caminhão Carl Benz 1866 | 35 |
| Figura 3 – Caminhão Mercedes (1923)..... | 35 |
| Figura 4 – Jurisdição sobre a malha Rodoviária pavimentada (1966-2000) | 39 |
| Figura 5 – Sistema de autoestradas brasileiro | 41 |
| Figura 6 – Sistema de autoestradas interestaduais americano | 41 |
| Figura 7 – Injetor de combustível para sistemas de ar comprimido indo primeiro motor a diesel (1895) | 45 |
| Figura 8 – Princípio do motor com Câmara de Pré combustão | 46 |
| Figura 9 – Primeiro veículo diesel com injeção direto (MAN,1924)..... | 47 |
| Figura 10 – Primeira produção em série de bombas para injeção de combustível Diesel, Bosch (1927)..... | 48 |
| Figura 11 – Ilustração trator a vapor o Garrett 4CD | 54 |
| Figura 12 – Ilustração Trator e implemento | 55 |
| Figura 13 – Ilustração Sistema de piloto automático | 57 |
| Figura 14 – Ilustração Ferramenta de gestão agrícola | 58 |
| Figura 15 – Mineração de carvão..... | 59 |
| Figura 16 – Protótipo da Escavadeira de Otis | 61 |
| Figura 17 – Primeira Escavadeira Kilgore Machine Company | 62 |
| Figura 18 – Pliny Holt operando o Nº 77 em 1905..... | 63 |
| Figura 19 – Protótipo de Dragline da Marion Steam Shovel Company | 64 |
| Figura 20 – Protótipo “Old Betsy” Motor diesel desenvolvido em 1928 por Clarence Leo Best..... | 66 |
| Figura 21 – Escavadeira hidráulica Poclain..... | 66 |
| Figura 22 – Escavadeira Volvo dos dias atuais | 68 |

| | |
|--|-----|
| Figura 23 – Evolução das Escavadeiras | 68 |
| Figura 24 – Primeiros modelos de carros elétricos 1859 | 73 |
| Figura 25 – Carruagem elétrica 1837 | 74 |
| Figura 26 – “Primeiro veículo elétrico transistorizado” | 76 |
| Figura 27 – Gurgel Itaipu (1974) | 76 |
| Figura 28 – GM EV1 (1996) | 78 |
| Figura 29 – Frota elétricos AMC (1970) | 80 |
| Figura 30 – Iveco Daily (2009) | 81 |
| Figura 31 – Divisão comercial de Veículos Elétricos | 82 |
| Figura 32 – Veículos pesado elétrico ilustrativo..... | 83 |
| Figura 33 – Diagrama esquemático elétricos | 84 |
| Figura 34 – Exemplo conector indutivo | 86 |
| Figura 35 – Ilustrativo Veículo híbrido pesado | 88 |
| Figura 36 – Gráfico comparativo motor elétrico e a combustão..... | 91 |
| Figura 37 – Diagrama representativo motores elétricos | 93 |
| Figura 38 – Motor CC com escovas | 94 |
| Figura 39 – Configurações motores de ímãs permanentes | 95 |
| Figura 40 – Figura Ilustrativa Baterias..... | 99 |
| Figura 41 – Exemplo de funcionamento KERS | 101 |
| Figura 42 – Esquema de funcionamento de controladores | 102 |
| Figura 43 – Modos de utilização dos controladores | 103 |
| Figura 44 – Equipamento Refrigerador TKT e suas aplicações | 105 |
| Figura 45 – Exemplar motor e-Delivery | 106 |
| Figura 46 – Figura esquemática de funcionamento para frenagem regenerativa ... | 107 |
| Figura 47 – VW eDelivey | 109 |
| Figura 48 – Esquema sistemas VW eDelivery..... | 110 |

| | |
|---|-----|
| Figura 49 – Mercedes Benz eActros 600 | 113 |
| Figura 50 – Volvo FH Eletric | 114 |
| Figura 51 – Processo produtivo simplificado GNV | 119 |
| Figura 52 – Cadeia de Produção e utilização de GNV | 123 |
| Figura 53 – Gráfico emissões GEE com o combustível Diesel..... | 125 |
| Figura 54 – Gráfico emissões GEE com o combustível GNV | 125 |
| Figura 55 – Rede de Distribuição de GNV | 129 |
| Figura 56 – Corredores Azuis na região Nordeste | 131 |
| Figura 57 – Distribuição GNV no Paraná | 131 |
| Figura 58 – Esquema GNV e seus sistemas em foco | 135 |
| Figura 59 – Cilindros de armazenamento GNV | 136 |
| Figura 60 – Sistema de distribuição GNV..... | 139 |
| Figura 61 – Sistema de Injeção eletrônica GNV..... | 141 |
| Figura 62 – Exemplo conversão para sistema Bicombustível..... | 145 |
| Figura 63 – Scania G60 GNV..... | 149 |
| Figura 64 – Novo Stralis NP e suas tecnologias..... | 153 |
| Figura 65 – Funcionamento de uma célula a combustível de Hidrogênio..... | 165 |
| Figura 66 – Veículo Toyota Mirai movido a H2..... | 169 |
| Figura 67 – Processo de eletrólise para a obtenção do hidrogênio | 172 |
| Figura 68 – Processo de produção do H2 a partir da Reforma a vapor | 174 |
| Figura 69 – Tanque de armazenamento do hidrogênio gasoso em um caminhão.. | 177 |
| Figura 70 – Tanque de armazenamento do hidrogênio líquido..... | 178 |
| Figura 71 – Posto de H2 a partir do Etanol desenvolvido pela USP com apoio da Shell | 181 |
| Figura 72 – Caminhão Hyundai XCIENT Fuel Cell movido a H2 | 185 |
| Figura 73 – Componentes do diferencial..... | 191 |

| | |
|---|-----|
| Figura 74 – Esquema da estrutura básica de um trator | 193 |
| Figura 75 – Demonstração Sistema hidráulico tratores | 194 |
| Figura 76 – Viga de controle | 195 |
| Figura 77 -- Implemento acoplado na TDP e sistema de três pontos | 196 |
| Figura 78 – Tomada de Potência | 197 |
| Figura 79 – Estrutura de Chassi Monobloco | 198 |
| Figura 80 – Estrutura de Chassi Convencional | 199 |
| Figura 81 – Estrutura do Chassi Articulado | 199 |
| Figura 82 – Fontes Energéticas Limpas | 201 |
| Figura 83 – Arquitetura de Trator Totalmente Elétrico | 202 |
| Figura 84 – Trator SESAM | 205 |
| Figura 85 – Estrutura do Chassi Elétrico | 205 |
| Figura 86 – Trator T4 Electric Power | 207 |
| Figura 87 – Trator Fendt e107 V Vario | 209 |
| Figura 88 – Motor e Transmissão | 210 |
| Figura 89 – Carregamento CA | 211 |
| Figura 90 – Carregamento CC | 211 |
| Figura 91 – Arquitetura de Trator Totalmente Elétrico | 203 |
| Figura 92 – Arquitetura de Trator Híbrido em Série | 218 |
| Figura 93 – Trator Híbrido AUGA M1 | 219 |
| Figura 94 – Cartuchos com Biometano | 221 |
| Figura 95 – Abastecimento dos Cartuchos com Biometano | 221 |
| Figura 96 – Trator T6 Methane Power | 223 |
| Figura 97 – Processo de obtenção do Biometano | 225 |
| Figura 98 – Simulação dos Benefícios Econômicos e Ambientais | 227 |
| Figura 99 – Caminhão movido a hidrogênio da usado pela Anglo American | 261 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 – Evolução dos limites do PROCONVE para veículos leves | 53 |
| Quadro 2 – Avaliação Motores para veículos elétricos | 96 |
| Quadro 3 – Aplicações típicas automotores de baterias..... | 100 |
| Quadro 4 – Análise Econômica da Substituição do Diesel por Gás..... | 240 |
| Quadro 5 – Comparação Econômica: Veículos Pesados Elétricos vs. GNV | 247 |
| Quadro 6 – Comparação em um ano de um Veículo pesado de mineradora | 257 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 – Diferentes tipos de células a combustível..... | 168 |
| Tabela 2 – Custo médio implementação estrutura de carregamento elétricos | 242 |
| Tabela 3 – Análise Custo Operacional Diesel x Elétrico | 244 |
| Tabela 4 – Comparação de custo e emissões na produção de Hidrogênio | 255 |
| Tabela 5 – Comparação dos PCI de combustíveis..... | 258 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|-----|
| Equação 1 – Reação Célula de Combustível | 165 |
| Equação 2 – Reação Global Eletrólise | 172 |
| Equação 3 – Equação de Oxidação Eletrólise..... | 173 |
| Equação 4 – Equação de redução Eletrólise..... | 173 |
| Equação 5 – Reforma do metano com vapor d'água:..... | 174 |
| Equação 6 – Reação de deslocamento do gás de água: | 175 |
| Equação 7 – Reação global (Hidrogênio Cinza):..... | 175 |
| Equação 8 – Reação de Reforma | 176 |
| Equação 9 – Reação de Deslocamento | 176 |
| Equação 10 – Reação Global (Hidrogênio Azul) | 176 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS SÍMBOLOS

ACV – Avaliação do Ciclo de Vida

AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva

AFC – *Alkaline Fuel Cell*

AMC – *American Motors Corporation*

AMS – *American Mine Services*

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores

ANP – Agência Nacional de Petróleo

ANM – Agência Nacional de Mineração

ARLA – Agente Redutor Líquido Automotivo

BESS – *Battery Energy Storage System* (Sistema de Armazenamento Baseado em Baterias)

BLDC – *Brushless DC*

CA – Corrente Alternada

CAGR – *Compound Annual Growth Rate*

CC – Corrente Contínua

CCAC – Coalizão Clima e Ar Limpo

CCLS – *Closed Center Load Sensing*

CCS – *Combined Charging System* (Sistema de Recarga Combinado)

CCUS – *Carbon Capture, Utilization and Storage*

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CFEM – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

CH₄ – Metano

CNI – Confederação Nacional da Indústria

CNM – Confederação Nacional de Municípios

CO – Monóxido de Carbono

CO₂ – Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CONPET – Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural

CV – Cavalos

CVT – *Continuously Variable Transmission*

DOE – *Department of Energy*

DPFs – Filtros de Partículas a Diesel

eCVT – (*Electronic Continuously Variable Transmission*)

EGR – Sistema de Recirculação de Gases de Escape (*Exhausting Gas Recirculation*)

EM – *Electrical Machine*

EMS – *Energy Management Strategy*

EMTU – Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ESS – *Energy Save System*

FATEC – Faculdade de Tecnologia

FETs – *Full Electric Tractors*

FND – Fundo Nacional de Desenvolvimento

FRN – Fundo Rodoviário Nacional

g/km – gramas por quilômetro

g/kWh – gramas por quilowatt-hora

GEE – Gases De Efeito Estufa

GEIA – Grupo Executivo da Indústria Automobilística

GNC – Gás Natural Comprimido

GNL – Gás Natural Liquefeito

GNV – Gás Natural Veicular

H₂S – Sulfeto de Hidrogênio

HMGMA – *Hyundai Motor Group Metaplant America*

HRS – *Hydrogen Refueling Station*

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

ICE – Motor a Combustão Interna

ICEV – Automóveis a combustão interna

ICMS – *Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços*

IEA – International Energy Agency

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPVA – Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores

IRENA – International Renewable Energy Agency

KERS - Kinetic Energy Recovery System

Kg – Quilos

Km/h – Quilômetros por hora

LH₂ – Hidrogênio Líquido

LOHC – *Liquid Organic Hydrogen Carriers*

MAN – *Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg*

MAP – *Manifold Absolute Pressure*

MIA – Máquinas & Inovações Agrícolas

MP – Material Particulado

NH₃ – hidrogênio em amônia

NO_x – Óxidos de Nitrogênio

NRMM – *Non-Road Mobile Machinery*

OBD – *Onboard Diagnostic*

ONU – Organização das Nações Unidas

PBEV – Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular

PEM – *Proton Exchange Membrane*

PMAC – *Permanent Magnet AC*

PMS – Ponto Morto Superior

PMSM – *Permanent Magnet Synchronous*

PNUMA – Programa de Nações Unidas para o Meio Ambiente

PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

PROMOT – Programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomotores e similares

PWM – *Pulse-Width Modulation*

RPM - Rotações por Minuto

SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito

SESAM – *Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery*

SHTP – Sistema Hidráulico de Tomada de Potência

SIMA – *Salon International du Machinisme Agricole*

STF – Supremo Tribunal Federal

TDA – Tração Dianteira Auxiliar

TDP – Tomada de potência

TIR – Taxa Interna de Retorno

TMS – *Transmission Motor Suspension*

TPS – *Throttle Position Sensor*

UCF – Universidade Central da Florida

UDOP – União Nacional da Bioenergia

UNEP – *United Nations Environment Programme*

VEBs – Veículos elétricos com bateria

VECCs – Veículos Elétricos com Célula de Combustível

VEs – Veículos elétricos

VHEPs – Veículos híbridos plug-in

VHEs – Veículos híbridos elétricos

VPL – Valor presente Líquido

WHSC – Ciclo Estacionário Harmonizado Mundial

WHTC – Ciclo Transitório Harmonizado

ZEV – Zonas de Emissões Verdes

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 25 |
| 1.1 | Motivação | 26 |
| 1.2 | Objetivo | 27 |
| 1.2.1 | Principais problemas enfrentados por cada segmento | 27 |
| 1.3 | Estrutura do trabalho | 32 |
| 2 | REVISÃO HISTÓRICA EVOLUÇÃO VEÍCULOS PESADOS | 34 |
| 2.1 | Uso dos caminhões no brasil..... | 36 |
| 2.2 | Infraestrutura rodovias brasileiras..... | 37 |
| 2.3 | Combustível Diesel | 42 |
| 2.4 | Motores Diesel | 43 |
| 2.4.1 | Formação de Mistura..... | 44 |
| 2.5 | Importância emissões na evolução veículos pesados | 49 |
| 2.5.1 | Evolução histórica sobre o controle de emissões Europa | 50 |
| 2.5.2 | Evolução histórica sobre o controle de emissões São Paulo | 52 |
| 2.6 | História e evolução dos tratores agrícolas | 54 |
| 2.7 | História Veiculos Pesados na Mineração..... | 58 |
| 3 | SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO RODOVIÁRIO..... | 71 |
| 3.1 | Alternativa Elétrica nos veículos pesados..... | 72 |
| 3.1.1 | Divisão das classes de Veículos elétrico | 81 |
| 3.1.2 | Aspecto geral tecnologia | 90 |
| 3.1.2.1 | Classificações de Motores | 93 |
| 3.1.2.2 | Motor na roda (in-wheel motor) | 97 |
| 3.1.2.3 | Arrefecimento motores | 97 |
| 3.1.2.4 | Baterias | 98 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.1.2.5 | Recuperação de Energia Cinética (KERS) | 101 |
| 3.1.2.6 | Controladores..... | 101 |
| 3.1.2.7 | Particularidades tecnológicas no uso em caminhões | 104 |
| 3.1.3 | Aplicações deste tipo de veículo na atualidade | 108 |
| 3.1.3.1 | VW e-Delivery | 109 |
| 3.1.3.2 | Mercedes-Benz eActros 600 | 112 |
| 3.1.3.3 | Volvo FH Eletric..... | 114 |
| 3.2 | Uso da tecnologia GNV nos veículos pesados | 116 |
| 3.2.1 | Ciclo de Produção GNV | 118 |
| 3.2.2 | Ciclo completo dos gases de efeito estufa em veículos pesados: da origem ao destino | 121 |
| 3.2.3 | Diferenças na disponibilidade entre GNV e diesel | 126 |
| 3.2.4 | Estrutura de reabastecimento GNV | 128 |
| 3.2.5 | Primeiros caminhões GNV | 132 |
| 3.2.6 | Funcionamento Geral tecnologia GNV | 133 |
| 3.2.6.1 | Conjuntos de armazenamento e alimentação..... | 135 |
| 3.2.6.2 | Sistema de Injeção e Combustão do GNV | 137 |
| 3.2.6.3 | Sistemas Complementares..... | 142 |
| 3.2.7 | Particularidades do uso em caminhões | 143 |
| 3.2.8 | Aplicações GNV na atualidade | 148 |
| 3.2.8.1 | Scania GNV G 460 | 149 |
| 3.2.8.2 | IVECO Stralis NP | 152 |
| 4 | SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO MINERAÇÃO..... | 157 |
| 4.1 | Possíveis soluções sustentáveis no segmento de mineração..... | 157 |
| 4.1.1 | Tecnologia a Eletricidade | 159 |
| 4.1.2 | Tecnologia a Biodiesel | 159 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.1.3 | Tecnologia a Hidrogênio..... | 160 |
| 4.2 | Utilização do Hidrogênio como Combustível | 161 |
| 4.2.1 | Células de Combustível..... | 163 |
| 4.2.2 | Utilização na indústria Automotiva..... | 168 |
| 4.3 | Produção do Hidrogênio..... | 171 |
| 4.3.1 | Hidrogênio Verde | 171 |
| 4.3.2 | Hidrogênio Cinza..... | 173 |
| 4.3.3 | Hidrogênio Azul..... | 175 |
| 4.4 | Armazenamento do Hidrogênio | 176 |
| 4.4.1 | Armazenamento de Hidrogênio Gasoso Comprimido..... | 177 |
| 4.4.2 | Armazenamento de Hidrogênio Líquido (Criogênico) | 178 |
| 4.4.3 | Armazenamento em Materiais Sólidos | 179 |
| 4.5 | Adaptação para veículos | 180 |
| 4.5.1 | Estações de Abastecimento de Hidrogênio (Hydrogen Refueling Station - HRS)..... | 181 |
| 4.5.2 | Infraestrutura de Transporte e Armazenamento | 182 |
| 4.5.3 | Desenvolvimento de Veículos com Células a Combustível | 184 |
| 4.5.4 | Tanques de Armazenamento de Hidrogênio | 186 |
| 5 | SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO AGRÍCOLA..... | 188 |
| 5.1 | Tratores agrícolas: Funções básicas | 190 |
| 5.1.1 | Sistemas Hidráulicos | 193 |
| 5.1.2 | Classificação dos Tratores | 197 |
| 5.2 | Aplicação Tratores Elétricos | 200 |
| 5.2.1 | Tratores Totalmente Elétricos..... | 202 |
| 5.2.2 | Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery (SESAM)..... | 204 |
| 5.2.3 | T4 Eletric Power | 207 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.2.4 | Fendt e107 V Vario | 209 |
| 5.2.4.1 | Avaliação do Desempenho Sustentável do Fendt e107 V Vario..... | 212 |
| 5.3 | Aplicação Tratores Híbridos | 213 |
| 5.3.1 | Híbrido Paralelo..... | 215 |
| 5.3.2 | Híbrido em Série | 217 |
| 5.3.3 | AUGA M1 | 219 |
| 5.3.4 | T6 Methane Power | 222 |
| 5.3.4.1 | Avaliação do Desempenho Sustentável do T6 Methane Power..... | 226 |
| 6 | CONCLUSÃO - COMPARAÇÃO ECONÔMICA E TECNOLÓGICA | 229 |
| 6.1 | Comparativo no Segmento Rodoviário | 230 |
| 6.1.1 | Vantagens e Desvantagens Propulsão Elétrica | 231 |
| 6.1.2 | Vantagens e Desvantagens Propulsão por GNV | 236 |
| 6.1.3 | Análise Econômica de Veículos Pesados | 238 |
| 6.1.3.1 | Investimento inicial nos veículos | 239 |
| 6.1.3.2 | Custo de Manutenção | 241 |
| 6.1.3.3 | Custo Operacional Geral | 243 |
| 6.1.4 | Conclusão Panorama Geral Rodoviários..... | 245 |
| 6.2 | Comparativo no Segmento Agrícola | 248 |
| 6.2.1 | Vantagens e Desvantagens dos Tratores Elétricos | 248 |
| 6.2.2 | Vantagens e Desvantagens dos Tratores Híbridos..... | 249 |
| 6.2.3 | Panorama Geral | 250 |
| 6.3 | Comparativo no Segmento Mineração | 252 |
| 6.3.1 | Impactos Ambientais | 253 |
| 6.3.2 | Desafios Econômicos | 255 |
| 6.3.3 | Eficiência Energética | 258 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6.3.4 | A implementação do hidrogênio no setor de mineração | 259 |
| 6.4 | Conclusão final com análise de todos os cenários | 262 |
| 7 | PROPOSTA TRABALHOS FUTUROS | 265 |
| 7.1 | Proposta 1: Adaptação de um Caminhão de Pequeno Porte (VUC) com Kit de Conversão a Gás Natural Veicular | 265 |
| 7.2 | Proposta 2: Avaliação da Viabilidade do Uso de Combustíveis Sintéticos em Motos e Veículos Leves no Contexto Urbano | 267 |
| 7.3 | Proposta 3: Uso do Álcool como combustível em veículos pesados..... | 268 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 271 |

1 INTRODUÇÃO

Analizando o contexto industrial mundialmente ao longo dos anos pode-se observar um avanço considerável da humanidade na questão tecnológica, com a primeira revolução industrial foi possível observar o nascimento nas primeiras padronizações de processos e uma evolução crescente de demanda e produção, potencializado pela revolução seguinte, e nas últimas 2 décadas uma expansão inimaginável.

Porém pode-se observar que esses diversos ganhos tecnológicos de forma quase instantânea teve um preço, o quesito de sustentabilidade foi por muito tempo negligenciado, refletindo em diversos impactos nas condições ambientais ao redor do mundo, portanto as indústrias buscam um uso mais consciente dos recursos naturais e processos visando a restauração e manutenção de boas condições ambientais.

Atualmente considerando um panorama mundial, apoiado nos dados de 2024 obtido pela empresa indiana *Mordor Intelligence*, como visto na Figura 1, o mercado de caminhões pesados, avaliado atualmente em US\$ 204,56 bilhões, deverá alcançar US\$ 313,95 bilhões em 5 anos. Isso representa uma Taxa de Crescimento Anual Composto ou *Compound Annual Growth Rate* (CAGR) de aproximadamente 7,4%. Tendo uma ascensão maior nos países asiáticos pelo grande volume de desenvolvimento em tecnologia híbrida e elétrica, mas ainda com um domínio considerável europeu sob este mercado.

Figura 1 – Análise Mercado Mundial de Veículos Pesados



Fonte: Mordor Intelligence (2024)

Já no cenário brasileiro, de acordo com dados da Confederação Nacional de Municípios (CNM), respaldados por um banco de dados da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN) de 2023, a frota total de veículos no Brasil atingiu aproximadamente 120 milhões, o que representa um crescimento de 50% em comparação ao volume de veículos registrado em 2013, há 10 anos. A divisão de veículos objeto de estudo deste trabalho, composta por ônibus e caminhões, representa 16% dessa frota.

Vale lembrar que o setor automobilístico cumpre um papel de suporte vital as demais atividades econômicas através das logísticas de transporte de insumos, mercadorias e até mesmo mão de obra, que é desempenhado pelos veículos pesados, entretanto pela sua alta exigência na aplicação é o segmento com um dos maiores índices de poluição em comparação os veículos leves, números divulgados pelo Programa de Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) em 2024 no site da Organização das Nações Unidas (ONU) indicam modestos 3,6% do valor total do comércio automotivo global, mas com emissões de CO₂ aumentando 30% desde 2000, com os caminhões contribuindo com 80% desse valor. Além disso, os veículos pesados são responsáveis por mais de 40% das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), mais de 60% de material particulado (PM 2,5) em estrada e mais de 20% das emissões de carbono negro.

Em desenvolvimento de soluções menos prejudiciais ao meio ambiente o cenário dos veículos leves, motocicletas e carros, ao nosso ver levam vantagem surgindo mais e mais divulgação de produtos por parte das montadoras, mas e no segmento dos veículos pesados que causam um maior impacto nos números gerais o que está sendo feito? É exatamente o que iremos abordar ao longo deste trabalho acadêmico.

1.1 Motivação

Desde antes da chegada deste semestre em que iremos dar início às pesquisas de trabalho de graduação já havia um interesse de um tema que pudesse reutilizar experiências de materiais concluídos por nós em graduações passadas contribuindo para uma pesquisa futura. Sendo eles um trabalho de graduação da análise de

motores de ciclo Otto realizado em 2022 na Faculdade de Tecnologia (FATEC) Santo André com a contribuição do aluno João Victor Golino Vital, o desenvolvimento de um artigo científico em métodos de amostragens de pragas e doenças na cultura da laranja com a participação da aluna Noemi Ladislau Lima da Costa em 2017 na FATEC de Pompéia e também pelo trabalho desenvolvido pelo aluno Rodrigo Soares de Azevedo, destacando os sistemas de suspensão com regeneração de energia realizado no ano de 2024.

Então surgiu esta ideia apoiados pelo nosso professor orientador Cleber Willian Gomes, de um estudo de caso explorando as mais diversas soluções tecnológicas no ramo de veículos pesados que já possuímos experiência teórica seja no conceito de funcionamento, mas também nos segmentos de aplicação que escolhemos pesquisar, fornecendo uma base consistente para entendimento e adquirir profundidade nas consultas.

1.2 Objetivo

Diante do alto volume de pesquisas em divulgações de soluções pró conservadorismo ambiental no segmento de veículos leves em relação aos demais, pretendemos com este trabalho apresentar aos leitores uma nova perspectiva em relação à evolução no mercado dos veículos pesados seguindo nesta mesma linha de sustentabilidade.

E, por consequência pretendemos ao fim desta obra, seja possível um olhar objetivo e claro em relação às novas tecnologias dos extrapesados e seja apresentado a alguns segmentos econômicos muito presentes em nossas vidas, mas que acabam passando despercebidos no dia a dia como por exemplo a mineração e agricultura que também são objeto de estudo desta pesquisa.

1.2.1 Principais problemas enfrentados por cada segmento

Para um melhor entendimento das tecnologias e achar bons caminhos para melhorias, separamos nesse tópico alguns dos principais desafios tecnológicos dos

transportes de carga pesada em cada um destes segmentos destacados acima que serão devidamente explorados neste trabalho.

Agrícola

Apesar de todos os avanços no campo, ainda é comum enfrentar dificuldades bem básicas no transporte interno das propriedades agrícolas, um dos maiores problemas está na compactação do solo causada pela passagem frequente de tratores e máquinas pesadas. Isso endurece o solo, reduz a porosidade e atrapalha tanto a absorção de água quanto o crescimento das raízes, o que, no fim das contas, acaba prejudicando diretamente a produtividade das lavouras. A compactação também pode ser persistente, exigindo intervenções mecânicas caras como subsolagem para reverter os danos, e mesmo assim, nem sempre com sucesso, essa realidade foi observada de forma bastante clara em diversos contextos agrícolas analisados por Shaheb et al. (2021).

No contexto da Argentina, estudos demonstraram que o tráfego de tratores com cargas elevadas compromete significativamente a estrutura do solo, independentemente do tipo de pneu ou sistema de plantio. Mesmo práticas conservacionistas, como o plantio direto, quando acompanhadas de tráfego intenso, resultam em aumento da densidade do solo e redução do rendimento de culturas como soja e trigo. As máquinas, embora necessárias, acabam virando um fator limitante da própria produtividade agrícola quando não se observa o impacto do peso por eixo e número de passadas, essas observações vêm sendo bem documentadas por Botta et al. (2022).

Nas operações agrícolas realizadas dentro de estufas, a situação é um pouco diferente, mas não menos desafiadora, o transporte interno, especialmente durante a colheita de tomates e outras hortaliças, ainda depende muito do trabalho manual, a mecanização esbarra na falta de espaço entre os cultivos e em obstáculos estruturais como colunas metálicas, que interferem nos sinais de GPS usados por veículos autônomos. Veículos elétricos não tripulados vêm sendo testados, com bons resultados em precisão e trajeto, mas os custos e limitações tecnológicas ainda dificultam sua aplicação em larga escala, esses pontos foram destacados por Guan et

al. (2025), ao descreverem o desenvolvimento de um transportador automatizado específico para ambientes protegidos.

Já no que diz respeito ao consumo de combustível e à poluição, os tratores e colhedoras movidos a diesel representam um problema ambiental considerável dentro das propriedades. Só na China, estima-se que a emissão de poluentes por máquinas agrícolas represente cerca de 17% a 22% da emissão total de tráfego rodoviário em algumas regiões. Isso se dá, em parte, pela baixa eficiência energética e pela manutenção inadequada desses equipamentos, que operam por longas horas e com motores pouco atualizados. A dependência de diesel, além de prejudicar o meio ambiente, também encarece o dia a dia das operações no campo, essa constatação vem dos dados apresentados por Ai et al. (2021), em um levantamento regional sobre o consumo energético do setor agrícola.

Na Coreia, situação semelhante se repete. Um estudo apontou que tratores agrícolas, tanto de pequeno quanto de grande porte, são importantes fontes de emissão de NOx e material particulado fino (PM2.5), sobretudo durante as atividades de preparo do solo e transporte de cargas dentro da fazenda.

O uso intensivo de tratores de grande porte, por exemplo, tem crescido devido à escassez de mão de obra rural, mas isso tem elevado os níveis de poluição atmosférica em áreas rurais, o que antes era visto apenas como um problema urbano, esses dados vêm do trabalho de Han et al. (2021), que analisaram inventários de emissão ligados às operações com tratores em áreas agrícolas.

Agrícola

Um dos maiores entraves enfrentados no setor rodoviário brasileiro está diretamente ligado à prática do excesso de peso nos caminhões, uma realidade comum apesar das regulamentações existentes. Esse excesso de carga reduz drasticamente a vida útil dos pavimentos, aumenta o risco de acidentes e gera custos expressivos com manutenção, o paradoxo está no fato de que, embora o transporte com sobrepeso possa reduzir o número de viagens e, assim, cortar custos operacionais, ele acaba gerando uma conta muito mais cara no longo prazo, tanto social quanto economicamente.

A substituição gradual dos caminhões a diesel por veículos elétricos ou movidos por Gás Natural Veicular (GNV) pode contribuir, ainda que indiretamente, para amenizar esse quadro. Isso porque esses veículos tendem a adotar tecnologias mais modernas e controle eletrônico de carga e tração, o que desestimula práticas abusivas como a sobrecarga e promove uma logística mais racionalizada, o caso do transporte de pedras ornamentais no Espírito Santo ilustra bem esse dilema, como analisado por Ghisolfi et al. (2019).

Quando se fala em transporte urbano de cargas, o problema muda de forma, mas não de gravidade. Nas cidades brasileiras, faltam políticas públicas estruturadas voltadas ao transporte de mercadorias, o que leva a uma série de medidas restritivas mal planejadas, muitas vezes, a solução adotada pelas prefeituras é simplesmente proibir ou limitar o acesso de caminhões a determinadas áreas, sem oferecer alternativas viáveis de transbordo ou horários estendidos para entregas.

Com isso, criam-se gargalos logísticos e aumentam-se os custos das operações urbanas, a introdução de frotas leves de entregas com GNV ou veículos elétricos pode ser uma saída promissora nesse cenário, pois além de emitir menos ruído e poluentes, esses veículos são geralmente aceitos em zonas de restrição, permitindo entregas em horários alternativos e maior flexibilidade operacional, a ausência de incentivos a essa transição, no entanto, ainda é um obstáculo. Essa visão é explorada por Oliveira et al. (2018), que analisaram dados de nove cidades brasileiras.

Outro aspecto importante está ligado ao impacto das barreiras físicas e legais sobre os custos logísticos, especialmente em períodos de crise como a pandemia da COVID-19, restrições de circulação, falta de áreas de carga e descarga e o fechamento de corredores logísticos agravaram os custos para transportadoras e empresas. Curiosamente, os efeitos negativos dessas restrições foram ainda mais sentidos antes da pandemia do que durante, já que muitos operadores adotaram soluções alternativas, como entregas noturnas e uso de modais alternativos, que acabaram sendo incorporadas à operação de forma definitiva.

Mineração

O uso de caminhões pesados movidos a diesel na mineração apresenta diversos desafios operacionais e ambientais. Um dos principais problemas está relacionado ao elevado consumo de combustível, especialmente em cenários onde as vias internas da mina se encontram deterioradas. Quando a manutenção das estradas não é realizada com a frequência necessária, o consumo de combustível pode aumentar significativamente, além de gerar impactos negativos na produtividade. Estudos de simulação demonstram que a falta de manutenção pode elevar o consumo em níveis alarmantes, comprometendo a eficiência geral da operação. A simples adoção de práticas como a utilização mais regular de motoniveladoras já mostra efeitos positivos na redução desses impactos, como apontado por Meneses e Sepúlveda (2023).

Mesmo em situações em que as estradas estão em boas condições, outros fatores ambientais e técnicos impactam diretamente o desempenho dos caminhões movidos a diesel. O esforço exigido para vencer rampas acentuadas, curvas mal planejadas ou pisos irregulares compromete a eficiência energética e eleva o consumo de combustível. A depender do cenário, modificações na configuração das vias ou na seleção dos veículos podem gerar reduções relevantes nas emissões e nos custos operacionais, tais conclusões são aprofundadas por Bodziony e Patyk (2024), que analisaram a influência do ambiente operacional sobre o desempenho energético e mecânico dos equipamentos.

Outro ponto de destaque refere-se às limitações de segurança. Devido ao porte dos caminhões e aos seus pontos cegos, há uma exposição significativa a riscos de colisão. Embora existam tecnologias de prevenção, muitas delas ainda não atingiram um nível de maturidade suficiente para aplicação ampla em campo. Grande parte das soluções analisadas ainda se encontra em fase experimental ou de laboratório, o que compromete sua eficácia real no ambiente hostil das operações de mina, essa realidade é abordada de forma criteriosa por Hrica et al. (2022), que evidenciaram a lacuna entre o potencial tecnológico e sua aplicação prática.

A organização do tráfego dentro da mina também desempenha um papel central no consumo energético e na eficiência dos ciclos operacionais, cruzamentos

mal planejados, velocidades inadequadas e paradas frequentes aumentam os custos com combustível e manutenção. Estudos que analisaram alterações simples, como o ajuste de rotas e velocidades, mostraram que é possível obter ganhos significativos mesmo sem investir na substituição de equipamentos. Essa perspectiva é evidenciada no trabalho desenvolvido por Vukovic (2013), que destaca como mudanças estratégicas no ciclo de transporte podem promover economia e redução de desgaste mecânico.

Diante dos desafios apresentados pelo diesel, ganha força a discussão sobre alternativas mais sustentáveis, os caminhões movidos a hidrogênio surgem como uma possibilidade promissora nesse contexto, além de eliminarem as emissões diretas, esses veículos operam com menor nível de ruído e vibração, o que favorece tanto o meio ambiente quanto as condições de trabalho.

Embora sua adoção em larga escala ainda esteja em estágio inicial, a integração dessas tecnologias com sistemas inteligentes e práticas operacionais eficientes tende a tornar essa solução cada vez mais viável, a partir das contribuições discutidas nas obras mencionadas, observa-se que a transição energética não é apenas necessária, mas também tecnicamente possível e cada vez mais próxima da realidade.

1.3 Estrutura do trabalho

Neste primeiro Capítulo estamos abordando nossas considerações sobre o projeto, apresentando resumidamente qual a razão deste trabalho e a forma como desejamos organizar e desenvolvê-lo.

No Segundo Capítulo a ideia é entendermos um pouco mais sobre o contexto histórico em que os veículos extrapesados estão inseridos e como foi sua evolução ao longo dos anos para chegar no que conhecemos hoje.

A partir da base histórica adquirida no segundo capítulo iremos iniciar neste as pesquisas em torno das soluções tecnológicas para este mercado e o segmento econômico escolhido neste momento é o setor rodoviário.

Seguindo a mesma linha de raciocínio do capítulo anterior será abordado o direcionamento tecnológico voltado à atividade de mineração.

Por fim, encerrando as pesquisas técnicas de evolução técnica escolhemos o setor agrícola que tenha uma imensa força e potencial no nosso país.

Conforme o que foi encontrado nas buscas nos capítulos anteriores será discutido com o nosso orientador as melhores escolhas para cada segmento do ponto de vista econômico e tecnológico.

2 REVISÃO HISTÓRICA EVOLUÇÃO VEÍCULOS PESADOS

Os veículos pesados desempenham um papel fundamental na economia, servindo como uma das principais vias para o transporte de bens essenciais em setores como agricultura, construção, varejo e manufatura. Além disso, o setor de veículos pesados contribui significativamente para a geração de empregos, desde motoristas até profissionais de manutenção, engenharia e logística, e impulsiona a economia por meio da arrecadação de impostos, investimentos em infraestrutura e inovação em tecnologias sustentáveis, como combustíveis alternativos e eletrificação. Em resumo, os veículos pesados não apenas sustentam o comércio e a indústria, mas também ajudam a manter a economia em movimento.

E em seu desenvolvimento histórico o pontapé inicial de suas aplicações pode se atribuir ao setor rodoviário, a versatilidade dos caminhões permite que eles atendam às necessidades específicas de diferentes indústrias. Desde modelos menores para transporte urbano até carretas para longas distâncias, os caminhões são equipados com tecnologias que facilitam o controle de carga, segurança nas estradas e eficiência no consumo de combustível. (MERCEDES , 2024)

Este produto de imensa utilidade iniciou sua história no final do século IX, segundo site oficial da marca Mercedes, após apresentação do primeiro veículo movido a gasolina em 1886, anos depois a dupla empreendedora Gottlieb Daimler e Carl Benz trouxe às ruas de Cannstatt, na Alemanha, em 1896 um veículo simples aos olhos de hoje, sendo considerado um caminhão apenas por seu propósito de transportar cargas, e não pessoas. Sem cabine como as que conhecemos atualmente, contava apenas com um assento para o motorista. As rodas eram revestidas com aros de ferro, e o motor de dois cilindros, movido a gasolina, ficava na parte traseira.

Tinha capacidade de carga de até 1,5 tonelada e, segundo notícias da época, era um caminhão "capaz até de dar marcha à ré", conforme vemos na Figura 2.

Figura 2 – Primeiro Caminhão Carl Benz 1866



Fonte: Site oficial Mercedes (2024)

Os conceitos de conforto, segurança e rentabilidade caminham lado a lado e, nos primeiros anos do caminhão, esse conceito se fortaleceu. Aos poucos, o motorista deixou de operar a céu aberto, e o design da cabine começa a ganhar forma, em 1923 surgiu o Benz 5K3, o primeiro caminhão a diesel do mundo, com um motor de 50 cavalos (CV) a 1.000 Rotações por Minuto (RPM) e capacidade de carga útil de 5,5 toneladas, marcando um avanço significativo na evolução histórica desse veículo, demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Caminhão Mercedes (1923)



Fonte: Site oficial Mercedes (2024)

2.1 Uso dos caminhões no Brasil

Conforme Silva (2011), desde o governo Vargas foram tomadas ações vitais para impulsão do mercado automotivo no Brasil, a Companhia Siderúrgica Nacional foi fundamental para fornecer a matéria-prima necessária para a indústria automobilística. Além disso, uma indústria nacional de autopeças começou a se desenvolver, especialmente durante a Segunda Guerra Mundial, quando a produção de autopeças atingiu cerca de 3 mil itens.

Além disso, em agosto de 1952, Vargas proibiu a importação de autopeças que já tinham similar nacional e, em março de 1953, vetou a entrada de veículos completos. Essas medidas visavam fortalecer a produção local e incentivar o desenvolvimento da indústria.

Já em 1954, Vargas criou a Comissão Executiva de Material Automobilístico para organizar e promover a indústria automobilística, mas seu suicídio em agosto do mesmo ano interrompeu o avanço dessas iniciativas. Isso teve um impacto significativo no processo de instalação da indústria.

A indústria automobilística começou a ser revitalizada no governo de Juscelino Kubitschek a partir de 1956, que trouxe uma nova onda de investimentos e políticas favoráveis ao setor. Juscelino promovia a ideia de "cinquenta anos em cinco", buscando modernizar a infraestrutura e a economia brasileira, o que incluiu o estabelecimento de montadoras e a expansão da produção de veículos no país.

Sob sua administração, o Brasil se tornou o décimo maior produtor mundial de veículos, o quinto de caminhões e o maior produtor de ônibus. Esse crescimento foi impulsionado pela instalação de fábricas de montadoras como Ford, Chevrolet e Volkswagen.

Apenas 29 dias antes da criação do Grupo Executivo da Indústria Automobilística (GEIA), a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA) foi fundada. Essa entidade civil teve um papel crucial em organizar e representar a indústria automotiva no Brasil, ajudando a estabelecer as bases para o crescimento do setor.

Segundo o Jornal Estadão (2023) o caminhão L-312, fabricado pela Mercedes-Benz, marcou um importante passo na história da indústria automobilística no Brasil,

sendo o primeiro caminhão produzido localmente, com lançamento em setembro de 1956. Seu design aerodinâmico e o motor de seis cilindros em linha com injeção indireta de diesel, que gerava 100 CV de potência, contribuíram para sua popularidade. Com capacidade de carga útil de até 6 toneladas, o modelo rapidamente ganhou o apelido de "Torpedo" devido ao formato afilado de seu cofre de motor, que lembrava um projétil.

Desde o lançamento do L-312, a tecnologia dos caminhões evoluiu significativamente. Alguns itens e tecnologias que eram comuns em caminhões antigos, como o L-312, mas que já foram ultrapassados, incluem:

- Transmissão Manual: Os caminhões mais antigos geralmente tinham transmissões manuais simples, enquanto os modernos agora utilizam sistemas automatizados e até transmissões *Continuously Variable Transmission* (CVT).
- Suspensão: O L-312 tinha uma suspensão menos sofisticada comparada aos modelos atuais, que incorporam tecnologias como suspensão pneumática para maior conforto e desempenho.
- Cabine: O design da cabine também evoluiu. Os caminhões antigos, como o Torpedo, tinham cabines mais simples e menos confortáveis, enquanto os modelos modernos são projetados com ergonomia e conforto em mente, além de estarem equipados com tecnologia de ponta.

2.2 Infraestrutura rodovias brasileiras

Segundo a dissertação de Lacerda (2005) o Fundo Rodoviário Nacional (FRN) e a evolução da arrecadação de impostos relacionados ao transporte e rodovias no Brasil. Criado em 1945, o FRN tinha como objetivo financiar a construção e manutenção das rodovias, utilizando recursos provenientes de impostos sobre combustíveis, serviços rodoviários e taxas sobre veículos.

A partir de 1974, no entanto, os recursos arrecadados com o imposto sobre combustíveis começaram a ser direcionados para o Fundo Nacional de Desenvolvimento (FND) e, em 1982, a vinculação do FRN ao setor rodoviário foi

extinta. Com o tempo, os impostos sobre combustíveis e serviços de transporte foram substituídos pelo Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), que é uma receita pertencente exclusivamente a estados e municípios. Além disso, o imposto sobre a propriedade de veículos, anteriormente compartilhado entre União, estados e municípios, foi alterado para o Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), que é de competência estadual e destinado apenas ao estado e seus municípios.

Essa mudança na estrutura tributária reflete uma transição significativa no financiamento da infraestrutura rodoviária no Brasil, transferindo a responsabilidade da União para os estados e municípios.

A continuidade e o fortalecimento da interrupção da vinculação de recursos para a infraestrutura rodoviária no Brasil, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988, que proíbe a vinculação de receita de impostos a órgãos, fundos ou despesas específicas. Essa proibição foi uma mudança importante na forma como os recursos públicos são alocados, promovendo uma maior flexibilidade na gestão fiscal.

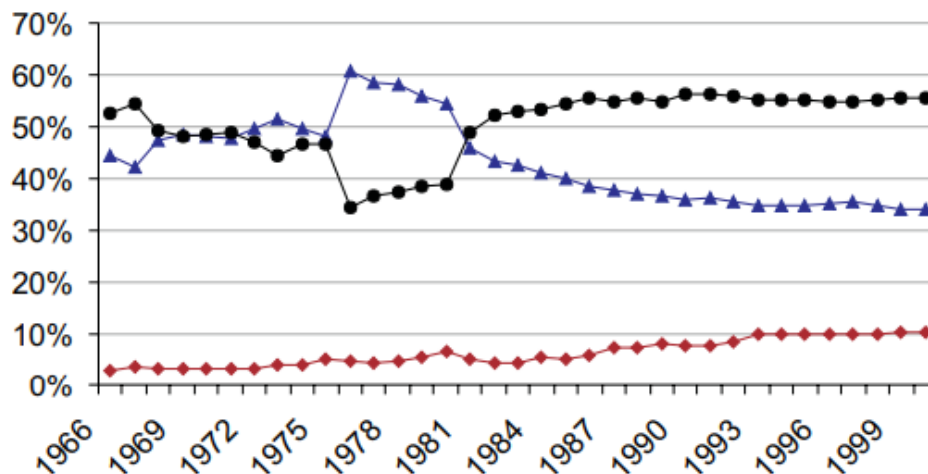
Em 1991, o Congresso Nacional tentou implementar uma taxa a ser incorporada no preço dos combustíveis, com o objetivo de financiar a conservação da malha rodoviária federal. No entanto, essa iniciativa foi considerada inconstitucional pelo Supremo Tribunal Federal (STF). O tribunal alegou que a taxa violava a proibição de vinculação de recursos prevista na Constituição e caracterizava uma bitributação, uma vez que já existiam impostos incidindo sobre a mesma base tributária.

Esse contexto reflete as complexidades e os desafios enfrentados na busca por recursos para a infraestrutura rodoviária no Brasil, destacando as limitações legais que podem dificultar a implementação de novos mecanismos de financiamento.

A busca por alternativas de financiamento para as rodovias brasileiras sempre enfrentou entraves legais e constitucionais. O caso da proposta rejeitada no início dos anos 1990 mostra como, mesmo diante da necessidade de ampliar recursos para a conservação da malha viária, a criação de novas formas de cobrança precisa respeitar limites jurídicos já estabelecidos, o que acaba dificultando a adoção de mecanismos inovadores de arrecadação.

Na Figura 4 podemos observar a forma como a responsabilidade pelas rodovias é dividida e como foi modificando ao longo dos anos.

Figura 4 – Jurisdição sobre a malha Rodoviária pavimentada (1966-2000)



Fonte: Lacerda (2005)

De acordo com Martins et al. (2013) o investimento em autoestradas no Brasil é realmente crucial, especialmente considerando suas dimensões continentais. A infraestrutura rodoviária não apenas facilita a mobilidade de pessoas e mercadorias, mas também desempenha um papel vital na integração econômica e social do país.

Apesar dos avanços desde 2003, quando os investimentos eram extremamente baixos, a situação ainda é insatisfatória. O aumento para 0,35% do PIB em 2009 é um sinal positivo, mas o Brasil ainda enfrenta desafios significativos na modernização e expansão de sua malha rodoviária.

A insuficiência da cobertura de autoestradas pode resultar em congestionamentos, acidentes e ineficiências no transporte, impactando negativamente a economia. Além disso, a falta de investimento contínuo pode comprometer a segurança e a qualidade de vida dos cidadãos, além de afetar a capacidade de defesa nacional. Portanto, um compromisso mais robusto com investimentos em infraestrutura rodoviária é fundamental para o desenvolvimento sustentável do Brasil.

Os EUA, com uma rede rodoviária já estabelecida, ainda enfrentam desafios de manutenção e atualização, o que ressalta a importância de um investimento

contínuo e robusto. Para um país como o Brasil, que está em um estágio de desenvolvimento de sua infraestrutura, a situação é ainda mais crítica.

Investimentos adequados em rodovias não só garantem a segurança e a eficiência no transporte, mas também promovem o crescimento econômico, atraindo investimentos e melhorando a logística. Para enfrentar esses desafios, o Brasil precisa de uma estratégia clara e de um aumento substancial nos investimentos em infraestrutura, tanto em termos de recursos financeiros quanto em planejamento a longo prazo. Isso inclui não apenas a construção de novas rodovias, mas também a manutenção e modernização das existentes, para garantir que a rede atenda às demandas atuais e futuras.

Os EUA, com uma rede rodoviária já estabelecida, ainda enfrentam desafios de manutenção e atualização, o que ressalta a importância de um investimento contínuo e robusto. Para um país como o Brasil, que está em um estágio de desenvolvimento de sua infraestrutura, a situação é ainda mais crítica.

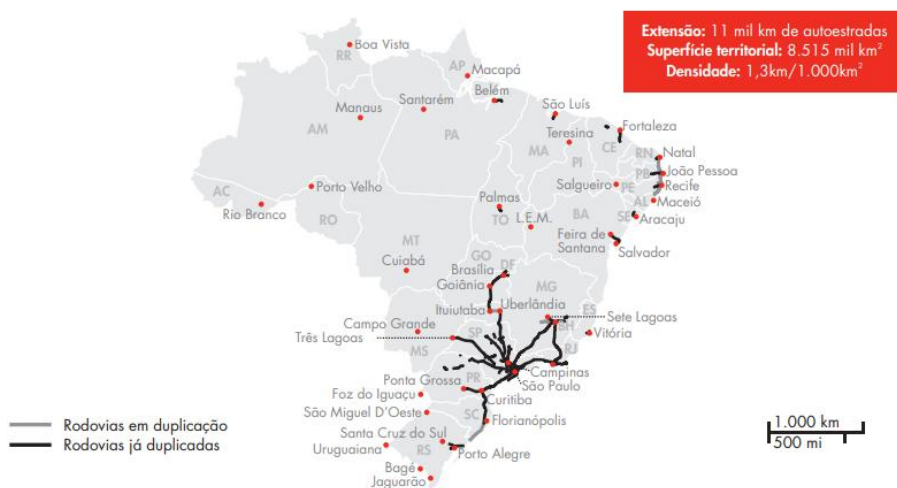
Investimentos adequados em rodovias não só garantem a segurança e a eficiência no transporte, mas também promovem o crescimento econômico, atraindo investimentos e melhorando a logística. Para enfrentar esses desafios, o Brasil precisa de uma estratégia clara e de um aumento substancial nos investimentos em infraestrutura, tanto em termos de recursos financeiros quanto em planejamento a longo prazo. Isso inclui não apenas a construção de novas rodovias, mas também a manutenção e modernização das existentes, para garantir que a rede atenda às demandas atuais e futuras.

Comparando com os Estados Unidos, onde em 2008 foi investido 0,8% do PIB nas estradas, é evidente que o Brasil precisa aumentar significativamente seus esforços para desenvolver e manter sua infraestrutura rodoviária.

A qualidade da malha rodoviária exerce papel crucial na segurança viária, no escoamento da produção e na competitividade econômica de um país. No caso brasileiro, a falta de investimentos consistentes compromete a eficiência logística e afeta diretamente o desenvolvimento regional. Para superar essas limitações, é necessário adotar políticas de longo prazo voltadas tanto à expansão quanto à conservação da infraestrutura existente, com alocação adequada de recursos e planejamento integrado.

Esta comparação pode ser observada ao analisarmos as Figuras 5 e 6, onde há uma diferença clara em rodovias duplicadas e sua abrangência no país.

Figura 5 – Sistema de autoestradas brasileiro



Fonte: Martins et al. (2013)

Figura 6 – Sistema de autoestradas interestaduais americano



Fonte: Martins et al. (2013)

2.3 Combustível Diesel

Impossível passar pela história dos veículos pesados sem citarmos a importância do diesel, combustível mais utilizado para alimentação das mais variadas aplicações em veículos pesados.

Segundo Myers (2021), o óleo diesel é principalmente constituído por carbono e hidrogênio, com pequenas quantidades de enxofre, nitrogênio e oxigênio. Essas características o tornam um combustível inflamável e medianamente tóxico, com um odor forte e característico.

A produção do óleo diesel ocorre a partir do petróleo, utilizando o processo de destilação fracionada. Esse método é adequado para separar misturas homogêneas que contêm múltiplos líquidos, como é o caso do petróleo. Durante a destilação fracionada, o petróleo é aquecido, e seus componentes se vaporizam em diferentes temperaturas, permitindo a coleta do óleo diesel e outros derivados em frações distintas.

O óleo diesel é amplamente utilizado em motores Diesel, que operam de maneira eficiente em veículos pesados e em aplicações industriais, devido à sua alta densidade de energia e capacidade de combustão. Essa descrição destaca a importância do óleo diesel como um combustível essencial na matriz energética e no transporte.

O óleo diesel é um composto formado essencialmente de carbono e hidrogênio e possui baixas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio. É um combustível derivado do petróleo, inflamável, medianamente tóxico. No Brasil, a Agência Nacional de Petróleo (ANP), a partir da resolução nº 65, de 2011, determinou que dois tipos de óleo diesel podem ser comercializados para o uso em veículos. São eles:

- Diesel tipo A: proveniente de processos de refino de petróleo sem a adição de biodiesel;
- Diesel tipo B: é o diesel tipo A que recebe a adição de biodiesel;

A mesma resolução da ANP de 2011 ainda classifica esses combustíveis, de acordo com os níveis de enxofre que eles apresentam:

- S10: diesel que apresenta 10 mg de enxofre por kg de óleo;

- S50: diesel que apresenta 50 mg de enxofre por kg de óleo;
- S500: diesel que apresenta 500 mg de enxofre por kg de óleo;
- S1800: diesel que apresenta 1800 mg de enxofre por kg de óleo.

2.4 Motores Diesel

Segundo material de Dietsche (2014), Rudolf Diesel (1858–1913) foi um engenheiro pioneiro nascido em Paris que aspirava revolucionar a tecnologia de motores desde jovem. Após se destacar em seus estudos no Politécnico de Munique, Diesel tinha como objetivo criar um motor com maior eficiência do que os motores a vapor, que eram populares na época. Ele se inspirou no ciclo isotérmico descrito pelo físico Sadi Carnot, teorizando que um motor projetado com base nesse princípio poderia alcançar níveis de eficiência superiores a 90%.

Apesar dos cálculos precisos de Diesel, o ceticismo dos fabricantes de motores sobre a viabilidade prática de seu projeto era generalizado. Empresas como a Gasmotoren-Fabrik Deutz AG mostraram-se relutantes em prosseguir com o projeto, especialmente devido à exigência inicial de Diesel de pressões de compressão extraordinariamente altas de 250 bar. Após extensos esforços, Diesel encontrou um parceiro na *Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg* (MAN) em 1893, embora tivesse que fazer concessões em relação ao seu motor ideal. A pressão exigida foi reduzida primeiro para 90 bar e, em seguida, para 30 bar, impactando a combustibilidade e levando Diesel a abandonar seu plano original de usar pó de carvão como combustível.

Na primavera de 1893, a MAN começou a construir o primeiro motor de teste não refrigerado. Inicialmente, o querosene foi considerado como combustível, mas a gasolina foi escolhida devido à crença equivocada de que esse combustível teria uma ignição mais fácil. O princípio da autoignição, onde o combustível é injetado em ar comprimido e aquecido, foi validado neste motor de teste, projetos subsequentes melhoraram o método de injeção de combustível, passando a usar ar comprimido para atomização.

O momento decisivo veio com o terceiro motor de teste, que incorporou uma bomba de ar de estágio único para a injeção de combustível. Em 17 de fevereiro de

1897, testes de aceitação realizados pelo Professor Moritz Schröder da Universidade Técnica de Munique confirmaram uma notável eficiência de 26,2%, uma conquista significativa para motores de combustão na época.

2.4.1 Formação de Mistura

Rudolf Diesel não pôde comprimir o combustível a pressões necessárias para a formação de gotículas finas e dispersão eficaz. Por isso, o primeiro motor diesel de 1897 utilizou a injeção com ar comprimido, onde o combustível era introduzido no cilindro com o auxílio de ar comprimido, conforme ilustrado na Figura 7. Esse processo foi adotado posteriormente pela Daimler em motores a diesel para caminhões.

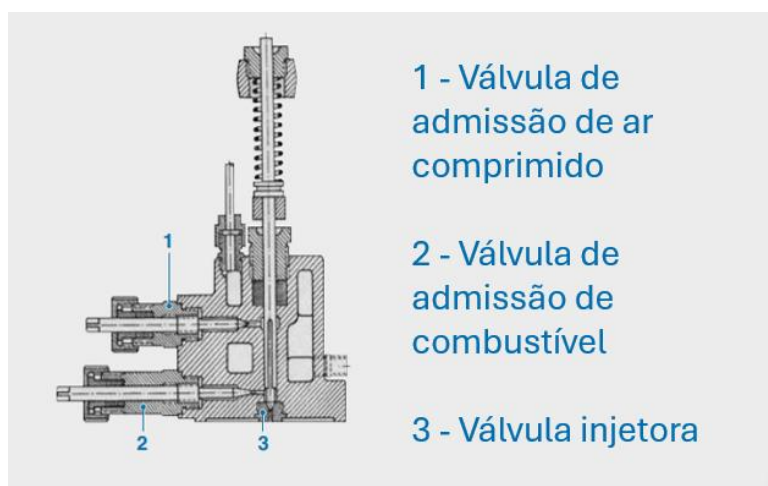
O injetor de combustível possuía duas entradas: uma para o ar comprimido (1) e outra para o combustível (2). Um compressor gerava o ar comprimido, que entrava na válvula (3), e, ao abrir o bico injetor, o ar forçava a entrada do combustível na câmara de combustão, formando gotículas finas que facilitavam a vaporização e a autoignição.

A sincronização com o virabrequim e o controle da quantidade de combustível eram ajustados pela pressão do ar comprimido, permitindo que baixas pressões de combustível fossem eficazes. Contudo, essa técnica tinha limitações: o baixo alcance do spray limitava a penetração do ar/combustível na câmara, resultando em excesso de combustível, aumento de fumaça e impedimento de velocidades mais altas.

Com o avanço da tecnologia, esses sistemas pneumáticos foram gradualmente substituídos por injeção mecânica direta, que passou a oferecer maior precisão na dosagem e no tempo de injeção do combustível. Isso permitiu uma queima mais eficiente, redução das emissões e melhor desempenho em altas rotações. Além disso, a melhora na atomização do combustível favoreceu uma combustão mais completa, contribuindo para o aproveitamento energético e para a diminuição do consumo em motores mais modernos.

Além disso, o compressor ocupava muito espaço, sendo um dos principais inconvenientes do motor.

Figura 7 – Injetor de combustível para sistemas de ar comprimido indo primeiro motor a diesel (1895)



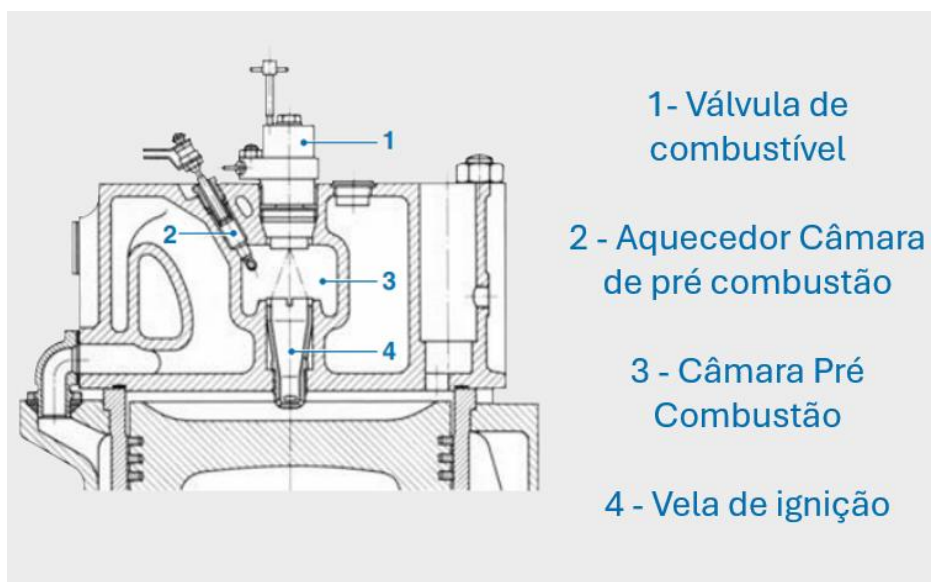
Fonte: Adaptado de Dietsche (2014)

A formação da mistura na câmara de combustão é assegurada pela queima parcial no motor com câmara de pré-combustão, um processo ainda utilizado hoje. Este motor possui uma câmara de combustão especialmente projetada, com um cabeçote hemisférico. A câmara de pré-combustão e a câmara de combustão estão interconectadas por pequenos orifícios, sendo que o volume da câmara de pré-combustão representa aproximadamente um quinto do volume total da câmara de compressão.

Neste sistema representado na Figura 8, toda a quantidade de combustível é injetada na câmara de pré-combustão (3) a uma pressão de cerca de 230 a 250 bar. Devido à quantidade limitada de ar nessa câmara, apenas uma pequena parte do combustível consegue se queimar. O aumento da pressão na câmara de pré-combustão, resultante da queima parcial, força o combustível não queimado ou parcialmente oxidado a ser empurrado para a câmara de combustão principal, onde se mistura com o ar, entra em ignição e posteriormente em combustão.

A função da câmara de pré-combustão é, portanto, a formação da mistura de ar e combustível. Esse processo, também conhecido como injeção indireta, tornou-se predominante e permaneceu assim até que os desenvolvimentos na injeção de combustível possibilitaram pressões de injeção suficientes para formar a mistura diretamente na câmara de combustão principal.

Figura 8 – Princípio do motor com Câmara de Pré combustão



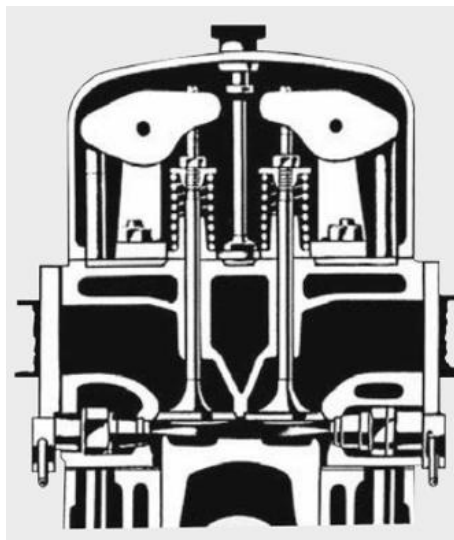
Fonte: Adaptado de Dietsche (2014)

O primeiro motor diesel da MAN operou com injeção direta, onde o combustível era forçado diretamente na câmara de combustão através de um bico. Na Figura 9 é mostrado em recorte a tecnologia dos bicos injetores diretos utilizados nestes motores.

Esse sistema de injeção direta proporcionava uma queima mais eficiente ao eliminar a necessidade de uma câmara prévia de combustão, comum nos motores com injeção indireta. Com a introdução do combustível diretamente na câmara, houve uma melhora significativa no controle da mistura ar-combustível, resultando em maior rendimento térmico e menor emissão de poluentes, essa configuração também favoreceu o desenvolvimento de motores mais compactos e potentes, atendendo melhor às demandas de aplicações industriais e de transporte pesado.

Este motor utilizava um óleo muito leve como combustível, que era injetado na câmara de combustão por um compressor, o que determinava as grandes dimensões do motor.

Figura 9 – Primeiro veículo diesel com injeção direta (MAN,1924)



Fonte: Dietsche (2014)

No setor de veículos comerciais, os motores de injeção direta reapareceram na década de 1960 e gradualmente substituíram os motores com câmara de pré-combustão. Já os carros de passeio continuaram a usar motores com câmara de pré-combustão devido aos níveis mais baixos de ruído de combustão até a década de 1990, quando foram rapidamente substituídos por motores de injeção direta.

Ainda em acordo com o raciocínio de Dietsche (2014) em 1886 Robert Bosch fundou uma oficina em Stuttgart para engenharia leve e elétrica, inicialmente focada em serviços de instalação e reparo de telefones, telégrafos e para-raios. Em 1897, a empresa ganhou destaque ao desenvolver um sistema de ignição por magneto de baixa tensão, proporcionando ignição confiável para motores a gasolina e impulsionando o crescimento da Bosch. Em 1902, seguiu-se o sistema de ignição de alta tensão com vela, cuja armadura ainda hoje é representada no logotipo da Robert Bosch GmbH.

Em 1922, Bosch voltou sua atenção para o motor diesel, acreditando que peças auxiliares para esses motores poderiam ser produzidas em larga escala com a mesma precisão dos magnetos e velas. Para o funcionamento eficaz dos motores diesel, eram

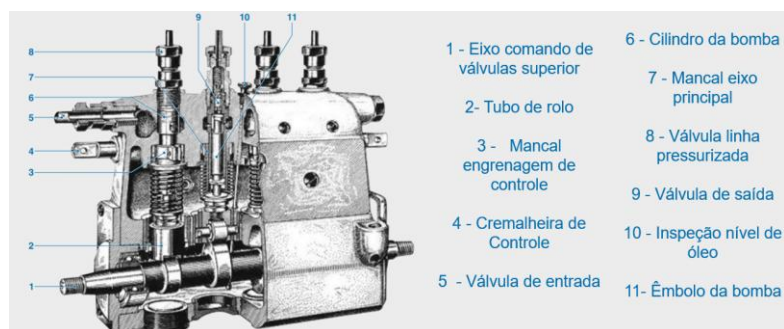
necessárias bombas de injeção de combustível e bicos que suportassem pressões de até várias centenas de atmosferas e fossem capazes de atomizar o combustível. Rudolf Diesel já desejava injetar o combustível diretamente, mas a tecnologia para isso ainda não existia, entrando assim, nos planos de desenvolvimento da grande marca alemã.

No início, a Bosch experimentou diferentes projetos de bombas de injeção: algumas controladas por carretel e outras por válvula. A quantidade de combustível injetada era ajustada pela variação do movimento do pistão. Em 1924, a Bosch desenvolveu uma bomba que atendia as exigências de motores de pré-combustão da Benz e de injeção direta da MAN, destacando-se pela taxa de entrega, durabilidade e compacidade.

Em março de 1925, a Bosch firmou um contrato com a Acro AG para usar suas patentes em sistemas de motores diesel com câmara de ar e suas bombas e bicos de injeção. Desenvolvida por Franz Lang, a bomba de injeção Acro era única e regulava a quantidade de combustível por uma hélice no carretel da válvula, posteriormente movida para o pistão da bomba.

Após a saída de Lang em 1926, a Bosch voltou a focar no desenvolvimento de suas próprias bombas, lançando em seguida sua primeira bomba de injeção diesel pronta para produção em série descrita na Figura 10.

Figura 10 – Primeira produção em série de bombas para injeção de combustível Diesel, Bosch (1927)



Fonte: Adaptado de Dietsche (2014)

2.5 Importância emissões na evolução veículos pesados

De acordo com o relatório Global EV Outlook 2024, para que ocorra uma redução de 15% nas emissões necessária até 2030, a rápida adoção de veículos de emissão zero, incluindo veículos pesados elétricos e de célula de combustível de hidrogênio será necessária para colocar o setor em uma trajetória favorável ao desenvolvimento sustentável. Por isso, mais países terão de adotar, reforçar e harmonizar as normas de economia de combustível dos veículos pesados.

As emissões no setor de transporte rodoviário continuam a crescer e em 2022 se recuperaram para cerca do nível de 2019. Os caminhões e ônibus são responsáveis por mais de 35% das emissões de Monóxido de Carbono (CO) diretas provenientes do transporte rodoviário.

Os governos estão anunciando metas ambiciosas nas implementações de zonas de emissões verdes (ZEV), e estão fazendo medidas mais duras para reverter o aumento de emissões. Na União Europeia, China e nos Estados Unidos, estão tendo o aumento promissores na implementação de caminhões elétricos, que permitirá uma diminuição nas emissões de CO.

Na União Europeia, em maio de 2024 foi adotado o Dióxido de Carbono (CO₂) padrão que exige uma redução de 90% de emissões até 2040, para a maioria dos caminhões novos e ônibus.

A China lidera na implementação de ônibus e caminhões elétricos, em 2023 atingiu 60% de vendas de ônibus elétrico a nível global e mais de 70% das vendas globais de caminhões elétricos.

O Estados Unidos, em março de 2024 a Agência de Proteção Ambiental dos EUA finalizou novos padrões de emissões de gases de efeito estufa para veículos pesados, que visa reduzir as emissões de gases de efeito estufa de veículos pesados em 25-60% em 2026 e lançaram no mesmo mês a Estratégia Nacional de Corredores de Carga com Emissão Zero, que estabelece uma infraestrutura de recarga para veículos elétricos de médios e pesados e ou reabastecimento para veículos movido a hidrogênio ao longo do corredor.

2.5.1 Evolução histórica sobre o controle de emissões Europa

Segundo site Transport Policy (2024) que divulga regulamentações dos veículos em geral na Europa diz que no continente começou-se a adotar padrões de emissão para veículos pesados em 1988. O sistema "Euro" foi formalizado em 1992, com regras cada vez mais rígidas introduzidas a cada poucos anos. Os padrões Euro para veículos pesados são identificados por números romanos (como Euro I, II... V), enquanto os padrões para veículos leves utilizam números arábicos (como Euro 1, 2... 5). Os testes são realizados apenas nos motores, e não em veículos completos, com os limites expressos em gramas por quilowatt-hora (g/kWh) em vez de gramas por quilômetro (g/km).

Desde então, muitos países adotaram regulamentações que em grande parte seguem os padrões europeus. Abaixo estão os principais marcos na regulamentação de motores pesados:

Euro I e II

Os padrões Euro I foram introduzidos em 1992, seguidos pela regulamentação Euro II em 1996. Esses padrões se aplicavam tanto a motores de caminhões quanto a ônibus urbanos, sendo que as normas para ônibus urbanos eram de natureza voluntária.

Euro III, IV e V

Em 1999, a União Europeia aprovou a Diretiva 1999/96/EC, que implementou os padrões Euro III (em 2000) e os padrões Euro IV e V (em 2005/2008). Esta diretiva estabeleceu limites de emissão voluntários, que eram um pouco mais rigorosos que os padrões Euro V.

As seguintes diretivas foram adições ou modificações importantes aos padrões originais:

- **Dispositivos de Derrota:** Em 2001, a Comissão Europeia adotou a Diretiva 2001/27/EC, que proibia a utilização de "dispositivos de derrota" e estratégias de controle de emissões consideradas "irracionais". Essa norma buscava impedir a redução da eficiência dos sistemas de controle de emissões em condições normais de operação.

- **Emendas Euro IV e V:** A Diretiva 2005/55/EC, aprovada pelo Parlamento da UE em 2005, introduziu requisitos para durabilidade e *Onboard Diagnostic* (OBD) e reafirmou os limites de emissão para Euro IV e V. Em uma abordagem de "níveis divididos", a Comissão descreveu os requisitos técnicos relacionados à durabilidade e OBD, incluindo disposições para sistemas de emissão que utilizam reagentes consumíveis.

Quando os padrões Euro IV e V foram adotados, os reguladores esperavam que os exigentes limites de material particulado exigissem o uso de Filtros de Partículas a Diesel (DPFs) em veículos comerciais pesados. No entanto, ajustando seus motores para altos níveis de NOx e uma boa eficiência de combustível, com baixas emissões de PM, os fabricantes conseguiram atender aos padrões sem usar DPFs. Em vez disso, utilizaram a redução catalítica seletiva para reduzir as emissões de NOx e cumprir as normas. No entanto, essa estratégia não foi tão eficaz em eliminar as menores e mais prejudiciais partículas como os DPFs.

Euro VI

Os padrões de emissão Euro VI foram estabelecidos pelo Regulamento N° 595/2009 e implementados pelo Regulamento N° 582/2011, este último que detalha os aspectos técnicos. Desde sua adoção, as regulamentações foram revisadas várias vezes para incluir novos elementos nas etapas de implementação.

Comparados aos padrões anteriores (Euro V), o Euro VI ajusta os limites de emissão, estende as disposições de durabilidade e introduz vários novos requisitos significativos. Entre eles, destacam-se:

Novos ciclos de operação, tanto transitórios quanto estacionários, como o Ciclo Transitório Harmonizado Mundial (WHTC) e o Ciclo Estacionário Harmonizado Mundial (WHSC);

Limites para o número de partículas;

Novos requisitos de testes, incluindo testes fora do ciclo e em uso;

Requisitos OBD mais rigorosos;

Limites de concentração de amônia (NH₃).

2.5.2 Evolução histórica sobre o controle de emissões São Paulo

De acordo informações da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2017) o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, conhecido como PROCONVE, foi estabelecido na década de 1980, em um contexto em que a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo indicava um alarmante aumento da poluição do ar nas áreas urbanas, especialmente na Região Metropolitana de São Paulo. Em 1986, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) publicou a Resolução n° 18, que definia os objetivos principais do programa, como a redução das emissões de poluentes dos veículos, com a finalidade de atender aos Padrões de Qualidade do Ar, e a promoção do desenvolvimento tecnológico tanto na indústria automobilística quanto nas metodologias de teste e medição de poluentes.

Além disso, a resolução propôs a criação de programas de inspeção e manutenção para os veículos em operação, bem como a conscientização da população sobre a poluição do ar e a importância do controle das emissões. Também destacou a necessidade de estabelecer critérios que permitissem a avaliação dos resultados alcançados, o que seria essencial para orientar a formulação e a evolução das normas. A gestão do PROCONVE foi delegada ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que, por sua vez, credenciou a CETESB para atuar como agente técnico e executivo do programa, aproveitando sua experiência em qualidade do ar e ensaios de emissão de veículos.

A partir da implementação do PROCONVE, as primeiras ações foram direcionadas à indústria automobilística, que passou a submeter seus modelos a testes de emissão para assegurar a conformidade com os padrões estabelecidos. A interação entre o IBAMA e a CETESB foi crucial para a construção de uma infraestrutura adequada, incluindo laboratórios dedicados ao desenvolvimento e ensaio de veículos, promovendo assim um avanço significativo na redução das emissões poluentes no Brasil.

Para alcançar o objetivo de reduzir os níveis de emissão de poluentes, foram estabelecidos padrões específicos para diferentes categorias de veículos no Brasil, divididos em veículos leves (L), que incluem automóveis de passageiros e veículos

leves comerciais, e veículos pesados (P), como caminhões e ônibus. Esses padrões, que se tornaram cada vez mais rigorosos, estão organizados nas diferentes "fases do PROCONVE", implementadas em intervalos irregulares.

Na década de 2000, foi introduzido o Programa de controle da poluição do ar por motocicletas, ciclomotores e similares (PROMOT), um programa focado no controle das emissões das motocicletas. A evolução dos limites de emissão dos principais poluentes para veículos leves pode ser visualizada nas diversas fases do PROCONVE. A fase mais recente, chamada L6, foi implantada em 2013 e mostrou uma redução significativa no limite de emissão de monóxido de carbono (CO), caindo de 24 gramas por quilômetro na fase L1 para apenas 1,3 gramas na fase L6. Essa redução de mais de 90% contribuiu significativamente para melhorar a qualidade do ar na Região Metropolitana de São Paulo. Segundo o Relatório de Qualidade do Ar de 2015, desde 2008, nenhuma das estações de monitoramento automático registrou inconsistências absurdas do padrão de qualidade do ar para CO em um intervalo de 8 horas. Essa evolução demonstra a eficácia das políticas públicas implementadas ao longo dos anos e seu impacto positivo na qualidade do ar, refletindo um compromisso contínuo com a saúde ambiental e pública. No Quadro 1 abaixo podemos analisar e observar a evolução dos padrões de monitoramento de emissões na região metropolitana de São Paulo.

Quadro 1 – Evolução dos limites do PROCONVE para veículos leves

| Fase PROCONVE / Resolução CONAMA | Período | CO (g/km) | HC (g/km) | NMHC (g/km) | NO _x (g/km) | RCHO (g/km) (1) | MP (g/km) (2) | Evap. (g/teste) (1) | CO-M.L. (%vol) (3) |
|----------------------------------|-------------|-----------|-----------|-------------|------------------------|-----------------|---------------|---------------------|--------------------|
| L1 / 18/86 | 1989–1991 | 24,0 | 2,10 | n.a. | 2,0 | n.a. | n.a. | 6,0 | 3,0 |
| L2 / 18/86 | 1992 – 1996 | 12,0 | 1,20 | n.a. | 1,4 | 0,15 | n.a. | 6,0 | 2,5 |
| L3 / 15/95 | 1997–2004 | 2,0 | 0,30 | n.a. | 0,6 | 0,03 | 0,05 | 6,0 | 0,5 |
| L3 / 315/02 | mai/2003 | | | | | | | 2,0 | |
| L4 / 315/02 | 2005 (40%) | 2,0 | 0,30 (4) | 0,16 | 0,25 (3) ou 0,60 (2) | 0,03 | 0,05 | 2,0 | 0,5 |
| | 2006 (70%) | | | | | | | | |
| | 2007(100%) | | | | | | | | |
| L5 / 315/02 | 2009 – 2013 | 2,0 | 0,30 (4) | 0,05 | 0,12 (3) ou 0,25 (2) | 0,02 | 0,05 | 2,0 | 0,5 |
| L5 / 415/09 | 2012 (1) | | | | | | | 1,5/2,0 (5) | |
| L6 / 415/09 | 2013 (2) | 1,3 | n.a. | 0,05 | 0,08 | n.a. | 0,025 | n.a. | n.a. |
| | 2014 (6) | | 0,30 (4) | | | 0,02 | n.a. | 1,5/2,0 (5) | 0,2 |

Fonte: CETESB (2017)

2.6 História e evolução dos tratores agrícolas

Para sua sobrevivência o homem sempre dependeu de recursos naturais, inicialmente na agricultura usava instrumentos rústicos e depois foram surgindo implementos como enxada e arado que eram acionados pela força humana ou animal. Com o passar do tempo e o aumento populacional, levou o aumento da demanda por alimentos, melhoramento e modernização das lavouras, assim surgindo os tratores a vapor.

Segundo Builchi (2016) o surgimento dos primeiros tratores acionados por motores a combustão externa (vapor) se deu em meados dos séculos XVIII.

O Trator a vapor mais conhecido é o Garrett 4CD, ilustrado na Figura 11, desenvolvido por Thomas Aveling em 1859, esse tipo de trator a vapor foi usado por volta de 1959, pois os tratores com motores a combustão interna ganhou mais espaço e o motor movido a vapor foi caindo em desuso de acordo com informações do site “O Mundo Variável” (2015).

Figura 11 – Ilustração trator a vapor o Garrett 4CD



Fonte: “O Mundo Variável” (2015)

Com o desenvolvimento do motor a combustão interna realizado por Nikolaus Otto em 1876 conforme Builchi (2016), o americano John Froelich em 1892 construiu o primeiro trator com motor à combustão interna.

No início, o trator e implemento não tinham relação do trator fornecer potência, mas era utilizado para arrastar o implemento, necessitando cada um de um operador para guiá-los, ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Ilustração Trator e implemento



Fonte: Paulo Builchi (2016)

Em 1902 o primeiro trator agrícola de sucesso foi fabricado por Dan Albone, tinha o nome de Motor Agrícola Ivel, com 8 cavalos de potência, o poder de arrasto era de 2500 Kg a 8 quilômetros por hora (Km/h) e tinha três rodas. John Ford, em 1907 fabricou o trator Fordson de quatro rodas, foi uma projeção de produção em massa.

Segundo material de Sánchez (2024) foi iniciada em 1917, a produção em massa do Fordson G pela Ford, que foi o primeiro trator agrícola a ser comercializado em todo o mundo. O trator teve uma rápida evolução e passou não apenas a só ter a função de tracionar, mas passou a incorporar outros recursos. Como em torno de 1919, a adição de uma extensão da árvore de manivelas do motor, que passou a ser denominada de tomada de potência (TDP). Então passou a ser possível também o acionamento, além da tração de máquinas.

Os motores dos tratores eram somente de combustão por centelha (ciclo Otto), isso foi até o final dos anos 1920. A partir de então surgiram os motores de combustão por compressão (ciclo Diesel). Em 1930 houve uma mudança das rodas dos tratores, as rodas de ferro foram substituídas por rodas de borracha.

Segundo Máquinas & Inovações Agrícolas (MIA) (2023) os tratores ainda eram arrastados, acopladas à barra de tração, foi desenvolvido solução mais prática para facilitar a manobra e facilitar o transporte. Em 1935 foi desenvolvido um sistema de levante hidráulico juntamente com o conjunto de engate de três pontos. Mas demorou um pouco para ser padronizado em questões de localização e dimensões. Essas padronizações foi acontecendo gradativamente nas décadas de 1940 e 1950.

No Brasil, no ano de 1940 chegaram as primeiras máquinas e implementos, foi um marco de transição da tração animal para a tração mecânica. A importação desses equipamentos se tornou mais frequentes nas décadas seguintes. No início de 1960 acelerou mais o crescimento no setor, pois foi criada e implantada a Indústria Brasileira de Máquinas e Implementos Agrícolas.

Em 1960 começou a produção de 37 tratores de rodas de média potência, essa especificação de potência foi feita pelo GEIA, que fixou especificações técnicas para cada categoria de trator de rodas a ser produzido pelas empresas, foi definido da época Leves, de 25 a 35 CV na barra de tração; Médios, de 36 a 45 CV na barra de tração; Pesados, mais de 45 CV na barra de tração, essas especificações foram mudando com o decorrer do tempo.

A partir do término da Segunda Guerra Mundial, até meados de 1965, ocorreram grandes mudanças no cenário econômico mundial, especialmente no Brasil, que se fortaleceu na industrialização.

Com o crescimento da produção agrícola e medidas de incentivo, a frota brasileira de tratores, que antes dessa época era em torno de 60 mil, cresceu para entorno de 800 mil unidades na década de 1990.

E de acordo com o último censo realizado pela Agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017, existe o registro de 1.229.907 tratores em 734.280 estabelecimentos agropecuários no Brasil. A ANFAVEA estima que sejam adquiridos aproximadamente 35 mil novos tratores a cada ano no Brasil. Esse aumento é decorrente dos programas de incentivo à mecanização da agricultura familiar, novos fabricantes e marca de tratores começaram a vir para o Brasil.

A evolução tecnológica fez com que o trator fosse para direção da automação. Na década de 1980, as primeiras soluções, foram pensadas para facilitar a ação do operador, a cabine que ainda era pouco usada começou a ser mais utilizada, por

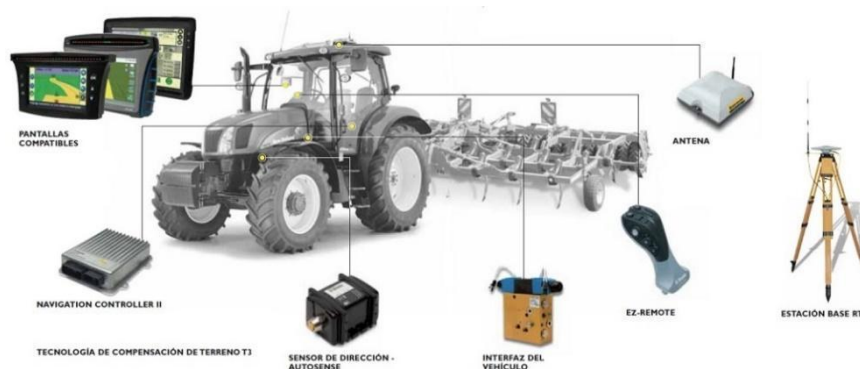
questões de proteção das intempéries, os comandos que eram manuais, por alavancas e chaves, foram substituídos por botões.

A partir dos anos 2000, novas e importantes funções de automação foram adicionadas ao trator, depois do surgimento dos sistemas de navegação global por satélites (GNSS), foi implementado o piloto automático.

Com a visão de Builchi (2016) esses avanços tecnológicos, visando melhorar a operação e buscando por um aumento na produtividade, foram implementados novas técnicas e instrumentos que permitissem melhor administrar as variações do solo (fertilidade) e variações no comportamento das plantas (produtividade).

As ferramentas utilizadas foram os microprocessadores, aparelhos de posicionamento global (GPS) acoplados às máquinas agrícolas, ilustrado na Figura 13, permitindo levantar dados cuja tabulação cumulativa possibilita a aplicação dosada e localizada de insumos.

Figura 13 – Ilustração Sistema de piloto automático



Fonte: Cárdenas (2018)

Assim também evoluiu a comunicação entre máquinas e ferramenta de gestão, com informações em tempo real por telemetria observado na Figura 14 facilitando a transferência de dados gerados pelo trator, com o intuito de prever antecipadamente os problemas e atuar de forma preventiva, permitindo assim tomar decisões mais assertivas e executar as operações e manutenções precisamente dentro de parâmetros predeterminados.

De acordo com MIA (2023) quando o trator passou a ter itens de automação, muitos dos implementos por ele tracionados e acionados evoluíram também e incorporaram componentes eletrônicos. Isso demanda a comunicação entre ambos, que passa a ser tratada por um complexo protocolo na forma de uma norma (ISO 11783), também conhecida como ISOBUS, que é um protocolo de comunicação de dados entre o trator e implemento, independente de origem, marca ou fabricante de ambos.

Figura 14 – Ilustração Ferramenta de gestão agrícola



Fonte: Cardenas (2018)

Já para Builchi (2016), a necessidade de aumentar as áreas de produção, fez com que as máquinas agrícolas fossem aprimoradas, tornando cada vez mais tecnológico, ajudando no aumento da produtividade; expansão da fronteira agrícola; e aceleração do desenvolvimento tecnológico, tanto nos tratores como nos implementos.

2.7 História Veículos Pesados na Mineração

Segundo o site da empresa americana *American Mine Services* (AMS) (2024) a mineração é uma atividade que existe há muitos séculos, desde as civilizações antigas. No começo, o trabalho era feito com ferramentas muito simples, como picaretas e pás, e dependia exclusivamente da força humana observado na Figura 15 e, em alguns casos, de animais. Os métodos de extração eram lentos e perigosos, e os mineradores precisavam cavar manualmente para chegar aos minerais.

As técnicas da época limitavam a profundidade das escavações e a quantidade de material que podiam extrair, o que tornava o processo pouco eficiente.

Figura 15 – Mineração de carvão



Fonte: Delano, 2025.

Com o tempo, novas tecnologias começaram a surgir e transformar a mineração. Uma das primeiras grandes inovações foi a pólvora, inventada no século IX, que permitiu que os mineradores quebrassem rochas mais duras e avançassem em áreas de difícil acesso.

Durante a Revolução Industrial as ferrovias resolveram um problema fundamental da humanidade no século XIX, o trem de ferro substituiu as carruagens e as diligências nas viagens longas, transformando completamente o transporte de pessoas e mercadorias na Era Moderna, em 1814, foi criada a primeira locomotiva a vapor, chamada *Blucher*, projetada pelo inglês George Stephenson. Em 1830, foi inaugurada na Inglaterra a primeira linha ferroviária, conectando as cidades de Liverpool e Manchester.

Segundo Mars (2016), no mesmo ano, os Estados Unidos começaram sua jornada ferroviária ao estabelecer uma linha entre Charleston e Hamburg, na Carolina do Sul. A criação do trem de ferro e a expansão das ferrovias ao redor do mundo representaram uma grande conquista tecnológica da humanidade.

Segundo Borges (2025), a ferrovia foi considerada a maior realização da Revolução Industrial, logo após a invenção da máquina a vapor, pois ela substituiu as forças naturais pela força mecânica, alterando não apenas a organização da produção

industrial, mas também os meios de comunicação. Dessa forma, a Revolução Industrial acelerou a modernização dos transportes, diminuindo os custos de circulação das mercadorias e permitindo a expansão para novos mercados. Nenhuma outra invenção tecnológica da época teve um impacto tão profundo na sociedade quanto as ferrovias; nenhuma outra inovação mostrou com tanta clareza o poder e a rapidez da Nova Era.

As máquinas de escavação, como as escavadeiras a vapor e outras máquinas pesadas, foram essenciais para vencer os obstáculos naturais durante a construção das ferrovias. Em muitos casos, os trilhos precisavam ser colocados por meio de terrenos acidentados, como montanhas, vales e rios. A escavação de túneis, a construção de pontes e a remoção de grandes volumes de terra eram tarefas monumentais que demandavam tecnologia especializada.

O uso dessas máquinas aumentou a eficiência da construção das ferrovias, permitindo que elas fossem feitas de maneira mais rápida e eficaz. Além disso, essas máquinas possibilitaram que as ferrovias fossem construídas em terrenos mais desafiadores, o que ampliou as possibilidades de expansão das redes ferroviárias para áreas remotas e de difícil acesso, conectando regiões antes isoladas.

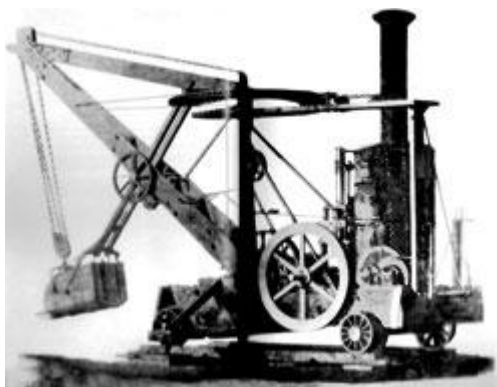
Além disso, a mineração foi fundamental para a construção das ferrovias, pois era a principal fonte de materiais necessários para a fabricação dos trilhos, das locomotivas e de outras partes essenciais das ferrovias. O ferro, extraído das minas, era o principal material utilizado na fabricação dos trilhos e das locomotivas a vapor. Além disso, o carvão, que também era extraído das minas, era o combustível utilizado nas locomotivas a vapor, essencial para que as ferrovias operassem com eficiência.

Portanto, a expansão das ferrovias estava intimamente ligada à expansão da mineração, pois as ferrovias precisavam dos produtos dessa atividade para seu funcionamento. A construção de novas ferrovias, por sua vez, também gerava uma demanda crescente por minerais, criando um ciclo contínuo entre a mineração e o transporte ferroviário.

Segundo Veloso, William Smith Otis foi um dos pioneiros na criação da primeira escavadeira e junto com a West, Weeks & Harrison na construção. Em 1835, aos 22 anos, ele desenvolveu um protótipo de escavadeira movida a vapor, patenteada em 1839. A máquina consistia em uma pá mecânica montada sobre um chassi ferroviário,

permitindo a escavação e remoção de terra de maneira mais eficiente do que os métodos manuais da época, observado na Figura 16. A escavadeira de Otis foi inicialmente utilizada na construção ferroviária, destacando-se por sua capacidade de movimentar cerca de 380 metros cúbicos de terra por dia. Sua invenção representou um avanço significativo na tecnologia de construção, influenciando o desenvolvimento de equipamentos mais sofisticados nas décadas seguintes.

Figura 16 – Protótipo da Escavadeira de Otis



Fonte: Veloso (2013)

Outro avanço significativo ocorreu em 1874, com o projeto de uma máquina a vapor totalmente metálica, feito por James Dunbar. Em 1875, a Ruston, Proctor & Co. adquiriu os direitos da escavadeira a vapor desenvolvida por James Dunbar. Essa máquina, conhecida como "Dunbar & Ruston's Steam Navy", foi utilizada na construção do Canal do Porto de Manchester, destacando-se como uma das primeiras escavadeiras a vapor empregadas em grandes projetos de infraestrutura.

Esse marco representou uma mudança importante na mecanização das obras civis, pois a adoção da escavadeira a vapor possibilitou um aumento expressivo na produtividade e na eficiência dos trabalhos de escavação. A robustez da estrutura metálica e a força motriz gerada pelo vapor permitiam operar em terrenos difíceis e movimentar grandes volumes de terra em menos tempo, reduzindo a dependência de mão de obra intensiva. Essa inovação abriu caminho para o desenvolvimento de equipamentos cada vez mais especializados e potentes, que viriam a transformar radicalmente o setor da construção pesada nas décadas seguintes.

Já na década de 1880, a *Armstrong & Company* desenvolveu a escavadeira hidráulica para ajudar na construção das docas de Hull, o que transformou a região em um importante porto comercial na Inglaterra. Em vez de utilizar fluido hidráulico, a invenção de Armstrong utilizava água, razão pela qual é conhecida como escavadeira hidráulica. Essa máquina era um modelo híbrido, utilizando cabos para movimentar a caçamba, mas com um cilindro hidráulico que acionava um sistema de roldanas multiplicadoras. A primeira escavadeira completamente hidráulica, que utilizava exclusivamente quatro cilindros de vapor de ação direta e dispensava o uso de cabos ou correntes, foi a escavadeira de ação direta fabricada pela *Kilgore Machine Company* em 1897, conforme vista na Figura 17.

Figura 17 – Primeira Escavadeira Kilgore Machine Company



Fonte: *Gregory Construction* (2025)

De acordo com Drew (2025) A escavadeira da Kilgore tinha uma impressionante gama de movimento e flexibilidade para a sua época, permitindo uma maior versatilidade nas operações. Alimentada por cilindros de vapor, a máquina oferecia uma capacidade de execução mais ampla de tarefas em comparação com as escavadeiras tradicionais que usavam cabos ou correntes. Ela podia se mover horizontalmente, o que a tornava mais eficiente em diferentes ambientes, especialmente ao lidar com pedras ou outros obstáculos. Sua capacidade de retirar a caçamba carregada sem precisar levantá-la até o topo do corte aumentava a eficiência na remoção de material. Além disso, a invenção de Kilgore consumia menos vapor (e,

consequentemente, menos combustível e água) do que outras máquinas do tipo, o que ajudava a reduzir os custos operacionais.

No ano de 1892 com a implementação das esteiras, a invenção do pneu e com a criação do motor a Diesel se abriu novas possibilidades para utilização de novas tecnologias nas escavadeiras. A Grande empresa no ramo, a marca *Caterpillar* é responsável por alguns marcos nos veículos pesados na mineração, segundo seu site oficial, a partir da junção da dupla Benjamin Holt e C. L. Best desenvolveram inovações que transformaram o trabalho de seus clientes. Em 1890, Holt projetou um trator a vapor que permitia aos agricultores trabalharem por períodos mais longos do que os cavalos conseguiam suportar. Por outro lado, Best focou-se no desenvolvimento de motores a gasolina, atendendo às demandas dos clientes com uma tecnologia mais moderna.

Conforme informações do site oficial da Caterpillar (2024) em 1904, Benjamin Holt inovou ao substituir as rodas traseiras de um trator a vapor Holt por um par de esteiras observado na Figura 18, com o objetivo de ajudar os agricultores da Caterpillar a trabalharem em solos mais macios e difíceis, conhecida como N° 77, recebeu seu primeiro teste em campo e teve um desempenho admirável.

Em 1905, um fotógrafo da empresa observou que a máquina se movia de forma semelhante a uma enorme lagarta, o que inspirou o nome "*Caterpillar*" carregado pela marca até hoje.

Figura 18 – Pliny Holt operando o N° 77 em 1905



Fonte: Caterpillar (2024)

Esses avanços não apenas aumentaram a eficiência no campo, mas também abriram caminho para a mecanização na agricultura, mudando radicalmente os processos de produção e cultivo de alimentos.

No mesmo ano em 1904, a *Marion Steam Shovel Company*, uma das principais fabricantes de máquinas de escavação da época, produziu uma versão inicial do que seria a escavadeira *dragline* moderna.

O desenvolvimento dessa tecnologia foi fundamental para a construção de minas de carvão e outros projetos de grande escala. A escavadeira dragline utilizava um braço longo, uma caçamba presa a um cabo, e um sistema de movimentação operado por uma rede de cabos e polias, este sistema permitia que a escavadeira movimentasse grandes volumes de material com precisão, observado na Figura 19.

Figura 19 – Protótipo de Dragline da Marion Steam Shovel Company



Fonte: Revista MT - A morte de um gigante (2025)

Em 1919, a Vulcan Iron Works de Toledo, Ohio de acordo com o site da *American Canal Society* (2025) criou-se a primeira escavadeira elétrica, embora ainda fosse necessário o uso de uma fonte de energia externa ou um gerador a gás a bordo, ambos gerando custos adicionais, a eletricidade ofereceu vantagens significativas sobre o vapor. Ela era mais eficiente, permitia que a escavadeira fosse operada imediatamente e eliminava os custos relacionados ao bombeiro, ao abastecimento de combustível e aos reparos nos sistemas de caldeiras.

A eletricidade passou a ser aplicada em uma variedade de escavadeiras. O modelo elétrico de menor porte foi o Marion Steam Shovel Company Modelo 21, com capacidade de 1 1/4 jardas cúbicas.

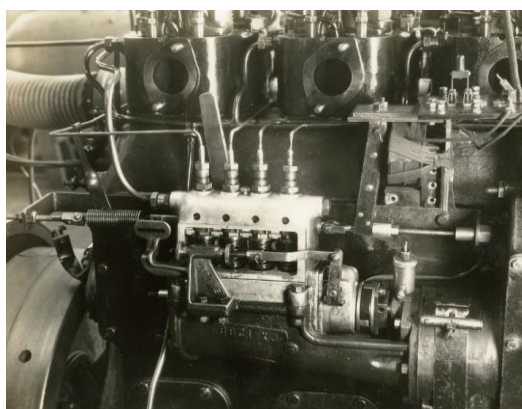
Com o aprimoramento dos motores de combustão interna para máquinas de construção, o uso da eletricidade diminuiu consideravelmente, sendo mantida em apenas duas áreas específicas, onde oferecia vantagens claras sobre os motores a gás e diesel: em ambientes fechados, como túneis e edifícios, e em grandes escavadeiras e *draglines* utilizadas em mineração e pedreiras. No caso dos túneis e edifícios, a eletricidade eliminava as emissões de escape (semelhante ao uso de ar comprimido, uma fonte de energia alternativa pouco comum em escavadeiras de túneis). Em máquinas de grande porte para mineração de superfície, a eletricidade era mais eficiente para alimentar os sistemas de trabalho remoto, como os motores que movem as esteiras e as dragas, ao invés de usar mecanismos mecânicos para transmitir a energia de uma fonte central. Hoje, grandes escavadeiras e *draglines*, utilizadas em minas de superfície ao redor do mundo, continuam sendo alimentadas por eletricidade, da mesma forma que a primeira escavadeira elétrica de 1919.

De acordo com site oficial da Caterpillar, mesmo enfrentando os desafios da Grande Depressão, a Caterpillar continuou investindo em produtos e tecnologias que permanecem essenciais para seus negócios até hoje. Expandindo as suas linhas de equipamentos, oferecendo soluções mais completas para construir, energizar e conectar o mundo, incluindo o lançamento da primeira motoniveladora verdadeira, chamada *Auto Patrol*.

Esse espírito de inovação e resiliência durante períodos econômicos adversos consolidou a Caterpillar como uma das líderes globais no setor de máquinas pesadas. Representou um salto tecnológico ao integrar em um único chassi as funções de trator e lâmina niveladora, oferecendo maior eficiência e controle nas operações de nivelamento de solo, esse avanço não apenas otimizou os processos de construção e manutenção de estradas, como também estabeleceu as bases para o desenvolvimento das motoniveladoras modernas, que ainda hoje são fundamentais em obras de infraestrutura em todo o mundo.

Para oferecer mais potência a um custo reduzido, o C. L. Best apostou na tecnologia a diesel. Em outubro de 1931, lançaram o primeiro Trator a Diesel Sixty da Caterpillar, ilustrado na Figura 20.

Figura 20 – Protótipo “Old Betsy” Motor diesel desenvolvido em 1928 por Clarence Leo Best



Fonte: Caterpillar (2024)

Em 1951, a Poclain lançou a TY45 observado na Figura 21, considerada por muitos a primeira escavadeira hidráulica de sucesso comercial do mundo. O modelo foi revolucionário por introduzir um sistema completo de acionamento hidráulico no lugar dos tradicionais sistemas a cabo, que dominavam o setor até então.

Figura 21 – Escavadeira hidráulica Poclain



Fonte: Drew (2025)

De acordo com a Foundation Poclain (2025), ao contrário das escavadeiras a cabo, que utilizavam roldanas e cabos de aço para operar a lança e a caçamba, a TY utilizava cilindros hidráulicos, movidos por óleo pressurizado, para controlar todos os movimentos da máquina. Essa inovação permitiu maior precisão, agilidade e força nas operações de escavação, além de facilitar o controle por parte do operador.

Todos os movimentos da lança, braço e caçamba eram feitos por meio de cilindros hidráulicos. Tinha uma estrutura rotativa de 360 graus a base giratória permitia que a máquina operasse em qualquer direção, algo incomum nas máquinas anteriores. Ao contrário das escavadeiras tradicionais montadas sobre trilhos, a TU era montada sobre pneus, o que facilitava seu transporte e mobilidade em terrenos firmes. Tinha um design modular e leve onde facilitava o transporte e reduzia o custo de manutenção.

Além disso, o sucesso da TY impulsionou o desenvolvimento de novos modelos, cada vez mais sofisticados e adaptáveis às necessidades do mercado, como as escavadeiras sobre esteiras, mini escavadeiras e modelos de grande porte para mineração pesada.

Após a Segunda Guerra Mundial, o setor da construção experimentou um rápido crescimento, com a construção de estradas e rodovias em diversas partes do mundo. Na década de 1960, diversos novos fabricantes de equipamentos de construção surgiram, o que levou ao aprimoramento do maquinário, tornando-o mais sofisticado, seguro e eficiente, como é atualmente.

Com o progresso da automação e das tecnologias digitais, as escavadeiras atuais, observado na Figura 22, passaram a contar com diversos recursos eletrônicos, incluindo GPS, sistemas de controle à distância, telemetria e sensores voltados à segurança. Essas inovações aumentaram de forma notável a precisão e a produtividade nas atividades de escavação, facilitando a execução de tarefas complexas com mais praticidade e proteção para os operadores.

A incorporação de tecnologias avançadas nas máquinas de escavação tem transformado o ritmo e a qualidade do trabalho no campo, possibilitando um controle mais refinado dos equipamentos e reduzindo o desgaste dos materiais, o que resulta em maior durabilidade e menores custos operacionais.

Além disso, a criação de versões elétricas acompanha uma tendência global por alternativas mais sustentáveis e com melhor desempenho energético.

Figura 22 – Escavadeira Volvo dos dias atuais



Fonte: TrecBel (2023)

Em imagem de elaboração própria com base nos sites da AMS, Gregory Construction (2025), Andaluga (2025), Grupo Trecbel (2025) e OEM Off-Highway (2025) visto na Figura 23, podemos passar um pouco por essa evolução, desde a primeira escavadora desenvolvida por Otis e gradualmente incorporando elementos hidráulicos e elétricos até os dias atuais.

Figura 23 – Evolução das Escavadeiras



Fonte: Autores, 2025.

Novamente de acordo com a evolução histórica do ponto de vista da AMS, nos dias de hoje, a mineração evoluiu ainda mais e conta com tecnologias avançadas. Máquinas automatizadas fazem grande parte do trabalho pesado, enquanto sistemas computadorizados ajudam a planejar e monitorar cada etapa da extração. Sensores e softwares de monitoramento em tempo real permitem que os mineradores acompanhem o trabalho com precisão, melhorando a segurança e a eficiência do processo.

Essa evolução mostra como a mineração se transformou ao longo do tempo, de uma atividade perigosa e manual para uma indústria moderna, que utiliza tecnologia de ponta para tornar o trabalho mais seguro, rápido e produtivo.

O ponto de mudança crucial na história da tecnologia de mineração ocorreu durante a Revolução Industrial. O rápido avanço tecnológico desse período resultou em um grande desenvolvimento nas técnicas de mineração, aumentando de maneira significativa a capacidade de extração. O equipamento de mineração evoluiu, passando de brocas manuais para brocas motorizadas e, eventualmente, para equipamentos movidos a ar comprimido, carros de mina e bombas a vapor. Essas inovações foram essenciais para melhorar a eficiência das operações e aumentar a quantidade de recursos extraídos.

Esse avanço na tecnologia marcou um passo importante na história dos equipamentos de mineração, pois trouxe um aumento significativo na produtividade. A mineração se tornou mais rápida e menos dependente de trabalho manual, o que permitiu que mais áreas fossem exploradas em menos tempo e com maior segurança. Assim, a Revolução Industrial não só revolucionou a produção em fábricas, mas também transformou a mineração em uma indústria muito mais eficiente e dinâmica.

Atualmente, a mineração apresenta um cenário muito diferente do passado, incorporando sistemas automatizados, softwares de monitoramento e equipamentos modernos que reduzem riscos e aumentam a eficiência das operações. Essa transformação, porém, começou a ganhar força ainda na Revolução Industrial, quando inovações como o uso de brocas motorizadas, bombas a vapor e outros recursos mecânicos impulsionaram a capacidade de extração. Desde então, a atividade deixou de ser predominantemente manual e arriscada para se tornar um setor altamente

tecnológico, no qual a produtividade e a segurança caminham lado a lado, consolidando a mineração como uma indústria estratégica e em constante evolução.

Esse processo de modernização não se limita apenas aos equipamentos utilizados na extração, mas também ao modo como toda a cadeia produtiva é organizada. Hoje, softwares de gestão e análise de dados permitem prever demandas, otimizar rotas de transporte e até reduzir impactos ambientais. A mineração, que antes era marcada por imprevisto e alto risco, passou a contar com planejamento integrado e tecnologias de controle em tempo real, garantindo operações mais precisas e alinhadas às exigências do mercado global.

Além disso, a incorporação de inteligência artificial, drones e sistemas de automação trouxe novas perspectivas para o setor. Essas ferramentas não só aumentam a produtividade, como também ampliam a segurança dos trabalhadores, diminuindo a exposição a ambientes perigosos. Assim, a mineração contemporânea se apresenta como resultado direto de séculos de evolução tecnológica, demonstrando que o setor está cada vez mais conectado à inovação e às demandas de sustentabilidade.

3 SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO RODOVIÁRIO

Nas últimas décadas, o mundo tem se deparado com uma crescente necessidade de repensar seus modos de produção, consumo e deslocamento. A preocupação com os impactos ambientais causados pelas emissões de gases poluentes, o esgotamento de recursos naturais e a urgência por alternativas mais limpas têm provocado mudanças significativas em diversos setores. Um dos que mais exige atenção é o transporte rodoviário de cargas, especialmente quando falamos de veículos pesados, caminhões e carretas que cruzam o país todos os dias, movendo a economia, mas também contribuindo de forma expressiva para a poluição do ar e o aquecimento global.

Diante desse cenário, surgem as tecnologias sustentáveis, que representam um novo caminho para o setor: mais eficiente, responsável e alinhado às exigências ambientais contemporâneas. Essas inovações não apenas visam reduzir os danos ao meio ambiente, mas também trazem oportunidades de modernização, economia e reposicionamento das empresas no mercado. No contexto dos veículos pesados, essas mudanças ganham ainda mais importância por causa da escala de impacto que possuem.

Este tópico propõe uma reflexão sobre como essas tecnologias estão transformando o transporte de cargas no Brasil e no mundo. Para isso, serão explorados dois exemplos centrais: os veículos elétricos pesados e os caminhões movidos a gás. Ambas as alternativas representam estratégias promissoras na busca por um setor mais sustentável e eficiente, cada uma com suas vantagens, desafios e possibilidades de aplicação. A partir dessa análise, espera-se contribuir para o entendimento das tendências que devem moldar o futuro do transporte rodoviário de cargas.

3.1 Alternativa Elétrica nos veículos pesados

Nos capítulos anteriores neste presente trabalho foi abordado a importância dos veículos pesado em nosso dia a dia, em um pouco de sua história, agora vamos entrar no detalhe em cada tecnologia escolhidas para análise, primeiramente iremos voltar a nossa atenção para aplicação da tecnologia de veículos elétricos no setor rodoviário entendendo brevemente como ela surgiu e em seguida como funciona e de que forma pode ser aplicada neste segmento

Conforme a revista escrita pelo pós-graduado em engenharia Elétrica Silvestre (2024) A trajetória dos Veículos elétricos (VEs) tem suas origens no século XIX, impulsionada pelo progresso no armazenamento de energia elétrica e pelos princípios do eletromagnetismo explorados por Alessandro Volta e Michael Faraday. Entretanto, foi apenas no final desse século, com avanços em eletroquímica e mecânica, que os primeiros Veículos Elétricos (VEs) funcionais foram desenvolvidos. Paralelamente, Karl Benz testou o primeiro automóvel movido a motor de combustão interna, um marco decisivo na evolução da indústria automotiva.

Conforme destacado por Noce (2009), em 1859, o belga Gaston Planté desenvolveu a primeira bateria de chumbo-ácido. Anos mais tarde, essa inovação passou a ser incorporada em veículos elétricos em países como a França, os Estados Unidos e o Reino Unido. Inicialmente, os automóveis tinham aparência semelhante à de carruagens tradicionais.

Esse período inicial foi marcado por uma intensa disputa tecnológica entre os veículos elétricos, a vapor e os movidos a combustão, cada um apresentando vantagens e limitações distintas, os VEs destacavam-se pelo funcionamento silencioso, pela facilidade de operação e pela ausência de emissões locais, o que os tornava ideais para ambientes urbanos. Contudo, sua autonomia limitada e o tempo de recarga das baterias ainda representavam obstáculos significativos. Mesmo assim, no final do século XIX e início do século XX, os veículos elétricos chegaram a representar uma parcela relevante do mercado automotivo, especialmente entre as elites urbanas, antes de serem gradualmente superados pela praticidade e alcance superior dos motores a combustão interna.

No entanto, com o passar do tempo, modelos mais avançados foram sendo projetados, capazes até mesmo de trafegar por estradas de terra como ilustrado na Figura 24, que apresenta um exemplar histórico desse período.

Figura 24 – Primeiros modelos de carros elétricos 1859



Fonte: Oliveira & Souza (2024)

De acordo com a perspectiva de Costa (2016), nos primeiros tempos, os automóveis elétricos ganharam destaque como opção de táxi em metrópoles como Londres, Nova York e Paris. Isso se devia à facilidade de recarga em garagens convencionais e à adequação desses veículos a distâncias curtas dentro das cidades. Chegaram, inclusive, a superar os modelos movidos a gasolina em vendas nos Estados Unidos por volta de 1900. No entanto, com o crescimento do uso dos carros a combustão, especialmente com a introdução do modelo Ford T, os elétricos acabaram perdendo competitividade no mercado. Os principais fatores dessa perda de espaço foram o custo elevado, a autonomia reduzida, a baixa velocidade e o longo tempo necessário para recarregar as baterias.

Quando se trata de analisar o surgimento dessa tecnologia, há diferentes interpretações. Contudo, uma categorização que consideramos bastante coerente é a de Noce (2009), que propõe uma divisão cronológica em quatro períodos distintos. Cada fase se diferencia tanto pela tecnologia utilizada quanto pelo contexto socioeconômico de seu tempo:

Primeira fase – 1837 a 1912

Em 1837, na Inglaterra, foi criada a primeira carruagem elétrica, quase 40 anos antes do primeiro carro a motor de combustão interna, já em 1897, Londres teve uma frota de táxis elétricos, e o auge da produção e venda de VEs aconteceu entre 1890

e 1910. Esses carros eram preferidos por muitos, pois não apresentavam os O marco inicial ocorreu em 1837, na Inglaterra, com o desenvolvimento da primeira carruagem elétrica antecipando em quase quatro décadas o surgimento do carro com motor a combustão interna. Em 1897, Londres já possuía uma frota de táxis elétricos, e entre 1890 e 1910, houve o pico na produção e comercialização desses veículos. Eles eram bastante valorizados na época por não apresentarem os inconvenientes típicos dos veículos movidos a combustão interna (ICEV) ou a vapor, como ruídos excessivos, emissão de fumaça, dificuldades na operação e riscos de acidentes. Entre esses perigos estavam os contragolpes do motor na partida com manivela e a possibilidade de explosões em sistemas a vapor.

Dessa forma, os veículos elétricos tornaram-se populares para percursos urbanos e para ocasiões sociais, como era amplamente divulgado nas propagandas do período conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 – Carruagem elétrica 1837



Fonte: Noce (2009)

Segundo informações trazidas por Baran & Legey (2011), em 1903, Nova York contava com cerca de 4 mil automóveis registrados. Desses, aproximadamente 53% utilizavam motores a vapor, 27% eram movidos a gasolina e os 20% restantes funcionavam com propulsão elétrica. Apesar disso, até 1912, a quantidade de veículos elétricos na cidade aumentou significativamente, atingindo cerca de 30 mil unidades. No entanto, nesse mesmo período, os carros a gasolina já dominavam amplamente o mercado, com uma vantagem de trinta para um em relação aos elétricos. A partir de então, iniciou-se um processo de declínio no uso dos veículos elétricos.

Diversas razões contribuíram para essa queda. Um dos principais fatores foi o advento da produção em larga escala dos veículos a combustão, idealizada por Henry Ford. Isso permitiu a comercialização desses automóveis a preços bastante reduzidos, variando entre US\$ 500 e US\$ 1.000, enquanto os elétricos apresentavam valores significativamente mais altos. Além disso, em 1912, foi introduzido o sistema de ignição elétrica, substituindo a partida manual por manivela e tornando os veículos a gasolina mais práticos e atraentes. Na década de 1920, a ampliação das rodovias, que passaram a interligar diferentes regiões, também evidenciou a necessidade de veículos com maior alcance, favorecendo novamente os carros a combustão.

Outro fator relevante foi a redução no custo da gasolina, impulsionada pela descoberta de reservas de petróleo no Texas, o que aumentou ainda mais a competitividade dos modelos movidos a combustíveis fósseis. Como resposta às limitações das baterias e à escassez de infraestrutura elétrica, surgiram as primeiras iniciativas de veículos híbridos. Já em 1903, foi produzido um modelo híbrido em escala comercial, com um pequeno motor a combustão alimentando um gerador, que por sua vez fornecia energia para dois motores elétricos responsáveis por mover as rodas dianteiras. Outro exemplo, fabricado entre 1901 e 1906, foi o híbrido paralelo: nesse sistema, o motor a gasolina impulsionava o carro diretamente e recarregava a bateria, enquanto o motor elétrico fornecia suporte adicional de potência.

Segunda Fase – 1912 a 1973

De acordo com Noce (2009), os veículos elétricos eram pouco comuns no mercado daquela época. Um exemplo notável foi o modelo Brougham, capaz de alcançar uma velocidade de até 51,5 km/h e com autonomia estimada em 97 km. Ainda assim, sua aceitação comercial foi limitada, com vendas bastante modestas. Já no final da década de 1950 e início dos anos 1960, preocupações crescentes com os impactos ambientais da poluição nos Estados Unidos motivaram o surgimento de novas tentativas de desenvolver carros elétricos. Um desses projetos foi o Henney Kilowatt, lançado em 1959. Equipado com baterias de chumbo-ácido, esse automóvel ficou conhecido, segundo Bennet (1960), como o “primeiro carro elétrico com tecnologia transistorizada” como pode ser observado na Figura 26.

Outro modelo representativo desse período foi o Chevrolet Corvair Elétrico, também chamado de Electrovair, que utilizava baterias de prata e zinco.

Apesar desses avanços, a aplicação da tração elétrica nessa fase ficou, em sua maioria, restrita aos sistemas de transporte coletivo como trens, bondes e ônibus e ao setor industrial, especialmente em veículos como empilhadeiras e equipamentos de mineração.

Figura 26 – “Primeiro veículo elétrico transistorizado”



Fonte: Noce (2009)

Terceira Fase – 1973 a 1996

Após os choques do petróleo ocorridos em 1973 e 1979, houve um esforço intensificado para encontrar alternativas ao uso de combustíveis fósseis no setor de transporte. Diversos experimentos foram realizados e alguns modelos de veículos chegaram, inclusive, a ser comercializados.

Um marco importante nesse contexto foi o lançamento do Itaipu, ilustrado na Figura 27, em 1974, reconhecido como o primeiro carro elétrico desenvolvido no Brasil, com autonomia de aproximadamente 60 quilômetros (NOCE, 2009).

Figura 27 – Gurgel Itaipu (1974)



Fonte: Quatro Rodas (2021)

Entre as décadas de 1970 e 1990, questões ambientais e a instabilidade no fornecimento de petróleo contribuíram para renovar o interesse pelos VEs. Já no final do século XX, os automóveis híbridos que combinam motores elétricos com propulsores a combustão começaram a ganhar notoriedade, especialmente com o suporte de políticas públicas que incluíam incentivos fiscais, investimentos em inovação e regras mais rígidas de emissões. Modelos como o Toyota Prius e o Honda Insight obtiveram grande sucesso, principalmente nos mercados japoneses e norte-americanos. Mais recentemente, a introdução de veículos elétricos plug-in, como o Mitsubishi i-MiEV e o Nissan Leaf, demonstra a contínua evolução dessa tecnologia (SILVESTRE, 2024).

Apesar dos esforços para aumentar a autonomia dos veículos elétricos ao longo da década de 1980, a queda nos preços do petróleo ao fim da crise reduziu o interesse por fontes energéticas alternativas. Paralelamente, os avanços da eletrônica permitiram melhorias significativas na eficiência dos motores a combustão, o que diminuiu ainda mais a atratividade dos VEs. No cenário brasileiro, o fortalecimento do programa “Proálcool”, que incentivou a produção e uso de veículos movidos a etanol, também contribuiu para enfraquecer a viabilidade comercial dos modelos elétricos (NOCE, 2009).

Quarta Fase – 1996 dias atuais

Segundo Noce (2009), a partir da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento — a Eco 92 — realizada no Rio de Janeiro, cresceu significativamente a atenção voltada aos problemas ambientais globais, especialmente à poluição urbana e ao aumento das emissões de gases do efeito estufa. Esse novo foco internacional resultou, alguns anos depois, na assinatura do Protocolo de Kyoto, em 1997, por meio do qual diversos países se comprometeram a adotar medidas para conter a emissão de carbono na atmosfera.

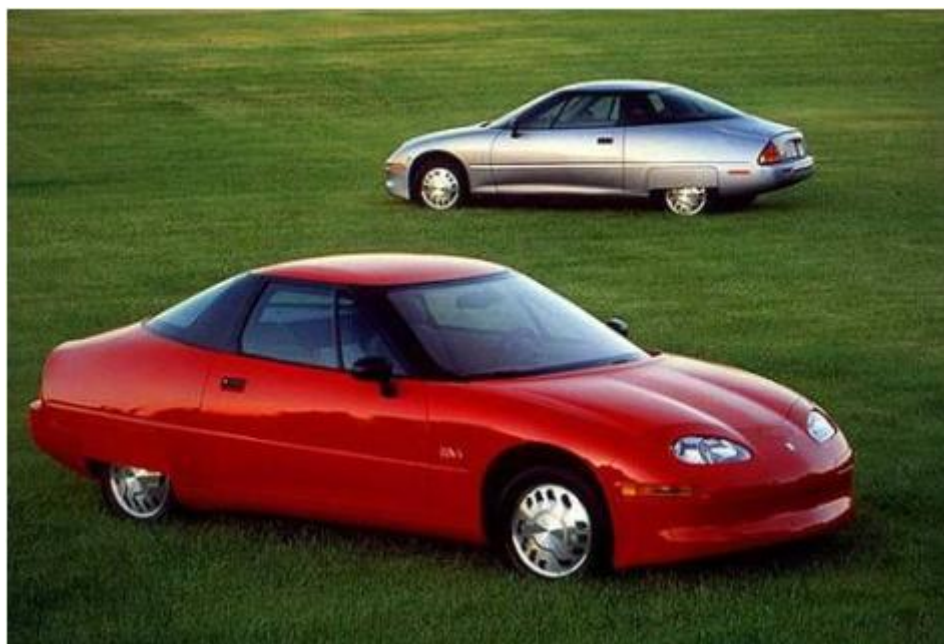
Com isso, a percepção sobre os veículos elétricos passou por uma mudança importante: eles deixaram de ser vistos como substitutos absolutos dos automóveis a combustão e passaram a ser encarados como uma alternativa promissora para mitigar os impactos ambientais, sobretudo em áreas urbanas, contribuindo para a redução da

poluição do ar e do ruído. A proposta, então, passou a buscar o desenvolvimento de modelos elétricos que apresentassem desempenho, autonomia e custo comparáveis aos dos veículos convencionais, porém com menor agressividade ambiental.

Dentro desse novo contexto, o lançamento do GM EV1, em 1996 representado na Figura 28 tornou-se um marco relevante. O modelo incorporava tecnologias inovadoras para a época, como baterias de última geração e sistemas de tração elétrica mais sofisticados, sendo um importante passo na evolução da mobilidade elétrica.

Mesmo que esses veículos ainda não fossem completamente isentos de emissões de CO₂ seu desenvolvimento marcou um avanço significativo rumo a soluções mais sustentáveis.

Figura 28 – GM EV1 (1996)



Fonte: Noce (2009)

Conforme relata Assumpção (2016), no início do século XX, os veículos elétricos passaram a ganhar espaço no transporte de cargas, gradualmente substituindo o uso de tração animal em regiões mais industrializadas. As primeiras iniciativas de eletrificação do transporte pesado surgiram como resposta à demanda por soluções mais eficazes e ambientalmente amigáveis para o deslocamento de

mercadorias em áreas urbanas. Empresas e gestores de grandes frotas começaram a investir em caminhões elétricos, atraídos por vantagens como operação silenciosa e menor custo de manutenção em comparação aos modelos com motores a combustão interna. Outro fator favorável era a ausência de emissões diretas, o que os tornava ideais para uso em locais fechados, como depósitos e unidades fabris.

Apesar desses benefícios, a autonomia limitada, devido às restrições tecnológicas das baterias da época, restringia o uso dos caminhões elétricos a trajetos curtos. Com o avanço dos motores a combustão e a disponibilidade de petróleo em grandes quantidades e a baixo custo, os veículos elétricos de carga foram sendo gradualmente deixados de lado. A Primeira Guerra Mundial também teve um papel decisivo nesse cenário, pois a indústria automobilística direcionou sua produção para caminhões a combustão destinados ao esforço militar. Ainda que sua presença no mercado tenha diminuído ao longo do século, essas experiências pioneiras serviram como base importante para os avanços posteriores na eletromobilidade.

Na década de 1970, durante as crises energéticas que afetaram os Estados Unidos, ressurgiu o interesse por alternativas aos combustíveis fósseis. Nesse contexto, a *American Motors Corporation* (AMC) desenvolveu os caminhões elétricos conhecidos como Electrucks, projetados especialmente para atender ao serviço postal norte-americano. Esses veículos foram empregados pelos correios em entregas urbanas, aproveitando os benefícios da propulsão elétrica — como funcionamento silencioso e ausência de emissões poluentes. Com uma autonomia média de 47 quilômetros e tempo de recarga estimado em oito horas, os Electrucks eram adequados para percursos curtos, nos quais a eficiência energética se tornava uma vantagem relevante.

No entanto, obstáculos como a tecnologia limitada das baterias e a escassez de infraestrutura para recarga impediram a adoção em larga escala. O alto custo de produção e a forte concorrência com veículos a gasolina, que ofereciam maior autonomia e já contavam com infraestrutura consolidada, também foram entraves importantes. Apesar dessas dificuldades, os Electrucks representaram um passo relevante ao demonstrar a viabilidade dos caminhões elétricos em aplicações urbanas.

Embora o projeto não tenha avançado por falta de incentivos e viabilidade econômica, sua contribuição para o desenvolvimento da mobilidade elétrica foi significativa, servindo como referência para inovações futuras. A Figura 29 ilustra um galpão da AMC com diversos exemplares desses modelos.

Figura 29 – Frota elétricos AMC (1970)



Fonte: Assumpção (2016)

O Brasil também deu importantes passos na direção da eletrificação do transporte de cargas, sendo um dos destaques dessa trajetória o lançamento do Iveco Daily Elétrico, considerado o primeiro caminhão elétrico de carga da América Latina. Apresentado em 2009, o modelo foi fruto de uma colaboração entre a montadora Iveco e a Itaipu Binacional, como parte de um programa voltado à promoção da mobilidade sustentável. Projetado especialmente para uso urbano, o veículo oferecia uma série de benefícios, como operação livre de emissões poluentes, redução significativa de ruído e custos operacionais inferiores aos dos modelos movidos a diesel.

O caminhão foi equipado com um motor elétrico MES-DEA de corrente alternada e utilizava baterias Zebra Z5, conhecidas por sua reciclabilidade, o que reforçava o compromisso ambiental do projeto. Essa iniciativa recebeu reconhecimento internacional, sendo agraciada com o prêmio de Destaque Tecnológico durante o Congresso SAE Brasil de 2009, destacando-se como um exemplo do potencial da eletrificação no setor logístico.

Apesar da inovação representada pelo Iveco Daily Elétrico, o projeto enfrentou entraves importantes, como a carência de uma infraestrutura adequada para recarga no território nacional e o elevado custo das baterias, o que acabou restringindo sua difusão comercial. Ainda assim, o lançamento desse modelo posicionou o Brasil como um dos precursores na adoção de caminhões elétricos na América Latina e impulsionou o desenvolvimento de novas soluções tecnológicas voltadas à eletromobilidade no país, a Figura 30 apresenta uma imagem desse modelo pioneiro.

Figura 30 – Iveco Daily (2009)



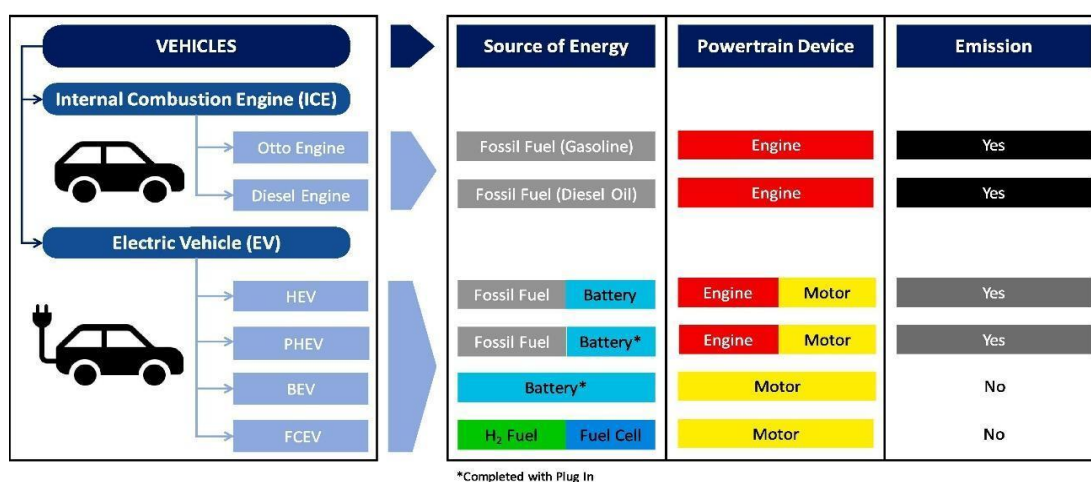
Fonte: Assumpção (2016)

3.1.1 Divisão das classes de Veículos elétrico

A divisão do mercado de veículos elétricos (VEs) é crucial para entender as diversas dinâmicas desse segmento em crescimento. Com a crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental e a busca por alternativas ao transporte tradicional movido a combustíveis fósseis, os VEs têm se destacado como uma solução promissora. Contudo, o mercado de VEs engloba várias categorias, que se distinguem principalmente pela forma de tração, capacidade de recarga e autonomia. As principais categorias incluem os veículos elétricos de bateria (VEBs), híbridos elétricos (VHEs) e híbridos plug-in (VHEPs), sendo que cada uma apresenta características

técnicas e vantagens específicas. Entender essa segmentação é essencial para avaliar as preferências dos consumidores, as estratégias de marketing das fabricantes e o impacto das políticas públicas na mobilidade elétrica. Além disso, essa análise possibilita identificar os desafios e as oportunidades enfrentadas por cada tipo de veículo, contribuindo para o avanço de uma mobilidade mais limpa e eficiente, esta divisão pode ser intuitivamente observada na Figura 31.

Figura 31 – Divisão comercial de Veículos Elétricos



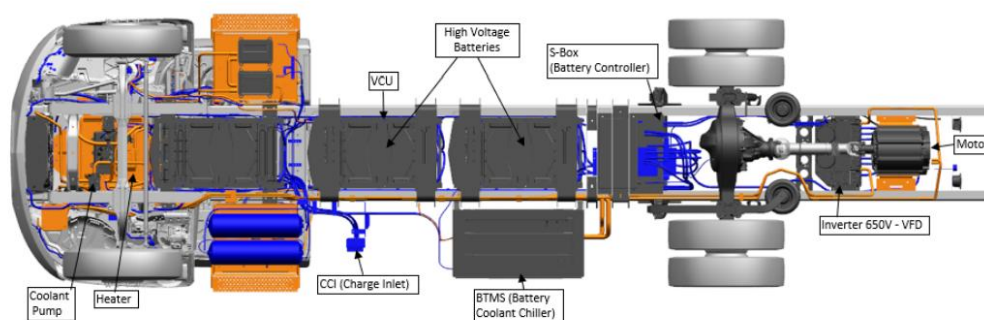
Fonte: Veza et al (2023)

Os Veículos Elétricos a Bateria são automóveis que utilizam exclusivamente motorização elétrica e são alimentados apenas por baterias que armazenam energia na forma de eletricidade, sendo, portanto, considerados veículos totalmente elétricos. O processo de recarga das baterias é feito através de um cabo conectado à rede elétrica, o que os torna veículos com a característica plug-in, já que a eletricidade é fornecida por uma fonte externa através de um plugue conectado a uma tomada.

Os automóveis movidos exclusivamente por eletricidade são classificados como totalmente elétricos, uma vez que não dependem de motores a combustão. Sua fonte de energia provém de baterias recarregáveis, que armazenam a carga elétrica necessária para o funcionamento do sistema de propulsão. A reposição dessa energia ocorre por meio da conexão a uma fonte externa de eletricidade, utilizando um cabo que se liga diretamente à infraestrutura elétrica, o que caracteriza esses veículos como do tipo plug-in.

Além disso, eles possuem um sistema de frenagem regenerativa que, parcialmente, recarrega as baterias ao recuperar energia mecânica gerada durante as frenagens. Na Figura 32 trouxemos uma figura que ilustrasse um veículo pesado elétrico indicando seus principais sistemas.

Figura 32 – Veículos pesado elétrico ilustrativo



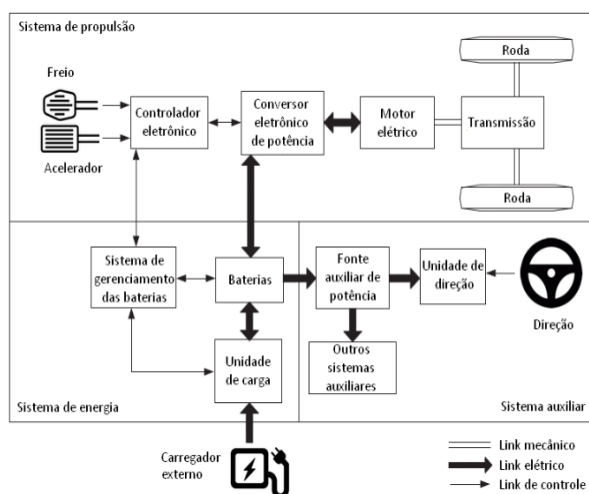
Fonte: *General Services Administration* (2023)

De acordo com estudos de Ehsani et al. (2018), a estrutura dos VEBs é composta por três sistemas principais: o sistema de propulsão, o sistema de energia e o sistema auxiliar. O sistema de propulsão, responsável pelo motor elétrico, inclui o controle do veículo, o conversor eletrônico de potência, o motor elétrico propriamente dito e a transmissão, quando necessário. O sistema de energia é composto pelas baterias, pelo sistema de gerenciamento das baterias e pela unidade de carga.

Já o sistema auxiliar tem como função garantir o funcionamento de componentes que não estão diretamente relacionados à tração do veículo, como os sistemas de iluminação, climatização, direção elétrica e dispositivos de segurança. Esses sistemas, embora não influenciem diretamente no desempenho dinâmico do veículo, são essenciais para garantir conforto, segurança e usabilidade no dia a dia. Com o avanço das tecnologias embarcadas, os sistemas auxiliares vêm ganhando complexidade e demanda energética, o que reforça a importância de um gerenciamento eficiente da energia disponível no veículo elétrico.

Por fim, o sistema auxiliar abrange o sistema de aquecimento/refrigeração, as bombas eletrônicas e outros dispositivos eletrônicos auxiliares, como ilustrado com o diagrama presente na Figura 33.

Figura 33 – Diagrama esquemático elétricos



Fonte: Mena et al (2020)

Os VEs são aqueles que utilizam um ou mais motores elétricos para sua locomoção, seja de forma parcial ou integral. A energia utilizada para movimentá-los é a eletricidade, que pode ser obtida por diferentes métodos: por meio de conexão direta a uma fonte externa via plugues ou cabos; através de cabos aéreos; por indução eletromagnética; por meio de células a combustível, que geram eletricidade a partir da reação entre hidrogênio e oxigênio; ou ainda por recuperação da energia mecânica durante a frenagem, conhecida como frenagem regenerativa. Essa energia elétrica é posteriormente armazenada em baterias químicas, que fornecem energia ao motor elétrico.

Embora as baterias apresentem uma densidade de energia consideravelmente menor quando comparadas a outras fontes, como hidrogênio ou gasolina, essa limitação é parcialmente equilibrada pela maior eficiência dos sistemas elétricos em relação aos motores a combustão interna (MENA et al, 2020).

O tempo necessário para o carregamento dos veículos é um fator de grande relevância e atua como uma das principais barreiras para uma adoção mais ampla dos Veículos Elétricos a Bateria.

Conforme Mena et al (2020) de maneira geral, os VEBs podem ser recarregados por dois métodos distintos: o carregamento condutivo e o indutivo. No carregamento condutivo, a transferência de energia elétrica ocorre por meio de contato físico entre os condutores, enquanto no carregamento indutivo, a transmissão de energia se dá por meio de indução eletromagnética, sem a necessidade de contato direto. Esta recarga pode ser classificada em quatro modos distintos, conforme o tipo de conexão, potência e nível de controle utilizado:

Modo 1:

Neste modo, o veículo é abastecido com energia elétrica em corrente alternada, por meio de tomadas convencionais de uso doméstico. São permitidas tensões monofásicas de até 250 V e trifásicas de até 480 V, com corrente máxima de 16 A e potência de até 3,7 kW. Não há comunicação entre o veículo e o ponto de carregamento. Para garantir a segurança da operação, é necessário que a instalação elétrica possua proteção contra sobrecorrente, aterramento adequado e dispositivo de detecção de fuga de corrente com desligamento automático do circuito.

Modo 2:

Semelhante ao modo 1, o carregamento é feito com corrente alternada, nas mesmas faixas de tensão monofásica até 250 V e trifásica até 480 V, mas com uma corrente máxima de 32 A e potência de até 22 kW. A principal diferença está na incorporação de um módulo de proteção e controle acoplado ao cabo de carregamento. Esse módulo monitora a conexão elétrica, verifica o aterramento e ajusta a taxa de carregamento conforme as condições do sistema.

Modo 3:

Neste tipo de carregamento, é utilizado um equipamento dedicado de maior capacidade, que realiza controle inteligente da operação e oferece proteções adicionais. Há troca de informações entre o veículo e o carregador. A recarga pode ser feita com corrente alternada trifásica de até 63 A e 480 V, ou corrente alternada monofásica de até 70 A e 250 V, com potência máxima de 44 kW.

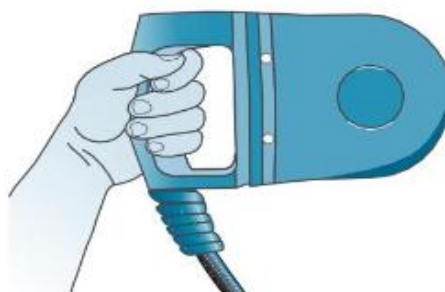
Modo 4:

O modo 4 se refere ao carregamento rápido em corrente contínua, com requisitos de segurança mais rigorosos. É utilizado um equipamento específico com cabo fixo, conectado diretamente ao veículo. O processo envolve a conversão de corrente alternada para contínua dentro do carregador. Devido às altas potências envolvidas, os condutores são dimensionados com bitolas maiores, e podem ser incorporados sistemas de refrigeração para viabilizar uma transferência energética ainda mais intensa.

Quanto ao carregamento indutivo, trata-se de uma alternativa sem contato direto, que permite a transferência de energia elétrica por meio da indução eletromagnética, semelhante ao princípio de funcionamento dos transformadores. Nesse sistema, a bobina primária é ligada à rede elétrica e a bobina secundária é instalada no veículo

A recarga indutiva pode ser realizada com o uso de um conector que contém um indutor encapsulado, como mostrado na Figura 34. Esse conector é levado até o veículo por um cabo e acoplado de forma alinhada ao indutor secundário existente no automóvel, permitindo a transmissão de energia por indução.

Figura 34 – Exemplo conector indutivo



Fonte: Mena et al (2020)

Ainda refletindo sobre as anotações de Mena et al (2020) uma alternativa para o reabastecimento de veículos elétricos é a substituição mecânica das baterias descarregadas por unidades previamente carregadas. Essa abordagem elimina o

tempo de espera associado ao carregamento convencional, aumentando a disponibilidade dos veículos e permitindo sua operação contínua, inclusive em regime de 24 horas.

No entanto, essa solução enfrenta diversos desafios. A instalação de estações de troca de baterias exige investimentos elevados, principalmente devido à necessidade de sistemas automatizados e à manutenção de um estoque de baterias carregadas prontas para uso. Além disso, as instalações requerem infraestrutura específica para armazenamento seguro e ocupam áreas significativamente maiores do que os pontos de recarga convencionais. Outro obstáculo importante é a ausência de padronização entre os fabricantes quanto às dimensões físicas e características elétricas das baterias, o que dificulta a implementação de um sistema universal de substituição para diferentes modelos de veículos.

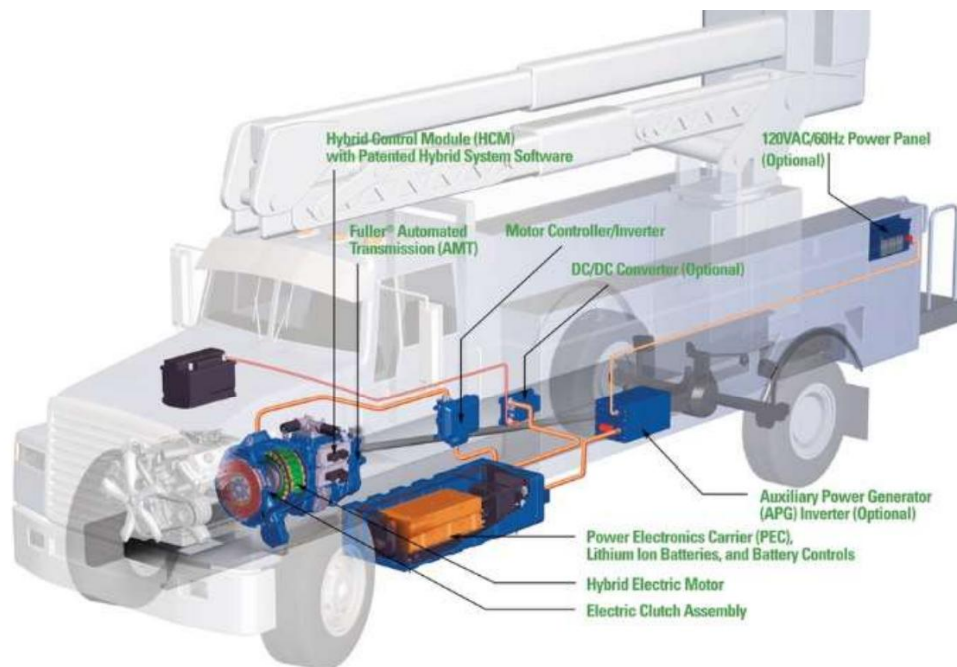
Já de acordo Antunes (2018) os VEHs são equipados com dois tipos de motorização: um motor a combustão interna e um motor elétrico. A eletricidade utilizada para recarregar as baterias é gerada pelo próprio veículo, principalmente por meio do sistema de frenagem regenerativa processo em que a energia cinética, gerada durante a frenagem, é convertida em energia elétrica.

Durante o início da operação do veículo, geralmente é utilizado apenas o motor elétrico. No entanto, quando há demanda por maior potência, o sistema ativa automaticamente o motor a combustão. Todo esse processo de transição entre os motores é gerenciado por um sistema eletrônico embarcado, que controla o funcionamento de forma inteligente e automatizada.

Além da transição inteligente entre os motores, outro aspecto relevante dos veículos elétricos híbridos (VEHs) é a otimização do consumo de combustível e a consequente redução das emissões de gases poluentes. Esse tipo de arquitetura permite que o motor a combustão opere em faixas de maior eficiência térmica, enquanto o motor elétrico atua em momentos estratégicos para reduzir o esforço do motor convencional. Essa sinergia entre os dois sistemas resulta em um desempenho mais equilibrado, com menor impacto ambiental e maior economia energética, principalmente em ciclos urbanos com tráfego intenso e frequentes paradas.

A Figura 35 apresenta um exemplo de veículo híbrido de passeio de carga, destacando alguns de seus principais componentes.

Figura 35 – Ilustrativo Veículo híbrido pesado



Fonte: Neiva (2019)

Novamente de acordo Mena et al (2020) existe ainda uma variação dos veículos híbridos convencionais, conhecida como Veículos Híbridos Plug-in (VHPs), que possuem a capacidade de serem recarregados diretamente pela conexão à rede elétrica. Esses modelos, geralmente, são equipados com baterias de maior capacidade energética, o que possibilita percorrer distâncias consideravelmente maiores utilizando apenas o motor elétrico, sem a necessidade de acionar o motor a combustão interna.

Os veículos híbridos surgem como uma solução intermediária, reunindo as vantagens dos veículos totalmente elétricos com as qualidades dos modelos movidos exclusivamente por motores a combustão. Em comparação aos veículos tradicionais, os híbridos oferecem maior eficiência energética e níveis mais baixos de emissão de poluentes. Já em relação aos VEBs, destacam-se por oferecer maior autonomia,

tempos de reabastecimento reduzidos e baterias menores, o que contribui para a redução de custo, diminuição do peso total do veículo e aumento do espaço interno.

Contudo, os híbridos também apresentam algumas limitações. Entre elas, o custo inicial mais elevado em relação aos automóveis convencionais, preocupações adicionais com segurança devido à presença de sistemas de armazenamento de energia e uma confiabilidade potencialmente inferior, em função da complexidade mecânica e eletrônica do sistema de propulsão, que reúne múltiplos componentes

Apesar dessas desvantagens, os híbridos têm se mostrado aptos a atender consumidores mais exigentes, contornando algumas das barreiras tecnológicas que ainda impactam negativamente a adoção ampla dos veículos totalmente elétricos

No cenário brasileiro, os veículos híbridos desempenham um papel estratégico, servindo como ponte entre a eletrificação do transporte, o uso de biocombustíveis e os interesses do setor petrolífero.

Os Veículos Elétricos com Célula de Combustível (VECCs) utilizam a reação química entre hidrogênio e oxigênio para gerar a eletricidade que alimenta o motor elétrico. Esse processo de conversão do hidrogênio em energia elétrica tem como subprodutos apenas vapor d'água e calor, sem gerar emissões poluentes.

Diferentemente dos VEBs, os VECCs não dependem do armazenamento prévio de eletricidade, pois produzem a energia conforme a necessidade, eliminando, assim, muitas das limitações associadas ao uso de baterias, como o longo tempo de recarga e a degradação com o tempo. Além disso, quando abastecidos com hidrogênio puro, esses veículos apresentam alta eficiência energética e não emitem Gases De Efeito Estufa (GEE) durante a operação (MENA et al, 2020).

Apesar de seu potencial, a tecnologia de células de combustível ainda está em desenvolvimento e enfrenta obstáculos significativos para se tornar uma alternativa comercial viável. Entre os principais desafios estão o alto custo dos sistemas, a escassa infraestrutura de abastecimento e a limitada disponibilidade de hidrogênio em larga escala.

3.1.2 Aspecto geral tecnologia

Atualmente, observa-se uma mudança significativa nas estratégias das grandes montadoras, como Honda, Toyota, Nissan, General Motors e Peugeot, que já oferecem modelos híbridos e, em muitos casos, veículos totalmente elétricos, alguns dos quais já disponíveis em Portugal por marcas como Smart, Nissan, Peugeot, Mitsubishi, Citroën e Renault. A simplicidade na configuração dos veículos elétricos e sua produção em pequenas séries também favoreceram o surgimento de fabricantes de menor porte, especializados exclusivamente nesse tipo de veículo, como Reva, Futi, Little4, Tazzari, Melex, Alka Dilixi e Zenn. Com a crescente eletrificação da mobilidade, espera-se que fabricantes de autopeças adaptem suas linhas de produção para componentes elétricos, e que postos de combustíveis evoluam para estações mistas com infraestrutura de recarga. Questões de segurança também ganham destaque, especialmente quanto aos riscos associados às baterias em casos de falhas ou acidentes, além da necessidade de instalar dispositivos sonoros nos veículos, devido à sua operação silenciosa, como forma de proteger pedestres.

Conforme Freitas (2012) em uma frenagem convencional, a energia cinética do veículo é dissipada em forma de calor devido ao atrito entre os discos e as pastilhas de freio. Esse processo resulta em perda de energia, que não pode ser reutilizada.

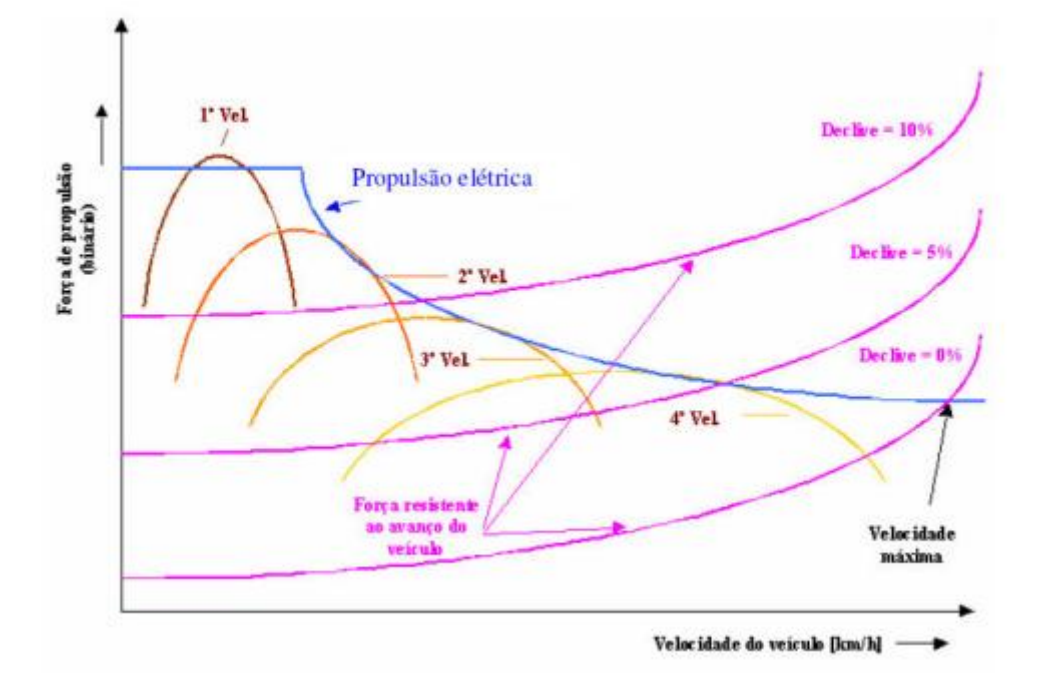
Por outro lado, a frenagem regenerativa possibilita recuperar parte dessa energia e convertê-la novamente em eletricidade, que pode ser armazenada e utilizada para impulsionar o veículo. Isso contribui para uma maior eficiência energética, especialmente em trajetos urbanos com paradas frequentes, além de reduzir os custos de manutenção, já que há menor desgaste do sistema de freios. O sistema mais comum utiliza o próprio motor elétrico como gerador, mas também existem soluções baseadas em volantes de inércia (*flywheel*) e em sistemas hidráulicos, que serão abordados mais adiante.

Já de acordo com Antunes (2018) nos motores elétricos, não há um limite mínimo de rotação para o funcionamento, pois, dependendo do seu tipo de construção o que será detalhado mais adiante, eles conseguem gerar torque mesmo quando estão parados, ou seja, em rotação zero. Essa característica permite, em muitos casos, dispensar transmissões com múltiplas marchas ou, ao menos, reduzir

significativamente o número de velocidades em comparação às transmissões utilizadas em motores a combustão interna (MCI). Quando a necessidade de múltiplas marchas é eliminada, torna-se possível também retirar o sistema de acoplamento entre o motor e a transmissão, como é o caso da embreagem, responsável por permitir a seleção dessas diferentes velocidades.

Podemos observar na Figura 36 uma comparação entre o torque transmitido às rodas em função da velocidade do veículo, contrastando o desempenho de veículos com motor a combustão interna e com motor elétrico.

Figura 36 – Gráfico comparativo motor elétrico e a combustão



Fonte: ANTUNES (2018)

Ainda de acordo com os estudos de Antunes (2018) Os VEs apresentam diversas vantagens em comparação aos veículos convencionais, sobretudo devido às características intrínsecas dos motores elétricos:

Uma das principais é a maior eficiência energética, resultado da conversão mais eficaz da energia elétrica armazenada nas baterias em forma de energia química

em energia mecânica. Ao contrário dos motores a combustão interna que exigem uma conversão termodinâmica do combustível para gerar movimento, os EVs operam de maneira mais direta e eficiente. Além disso, o motor elétrico consome energia apenas quando o veículo está em movimento, o que se alinha perfeitamente ao uso urbano, já que não há exigência de uma rotação mínima constante como ocorre nos MCIs.

Outro benefício significativo é a redução da frequência e complexidade da manutenção. Devido às temperaturas mais baixas envolvidas na conversão de energia nos EVs, há menor desgaste de componentes como peças de atrito, sistemas de lubrificação e vedações. Além disso, o motor elétrico possui um número significativamente menor de partes móveis e não realiza movimentos alternados que possam gerar vibrações. Em motores elétricos de corrente alternada, a manutenção preventiva é geralmente limitada à substituição dos rolamentos do induzido, algo que costuma ocorrer apenas após cerca de 100.000 km.

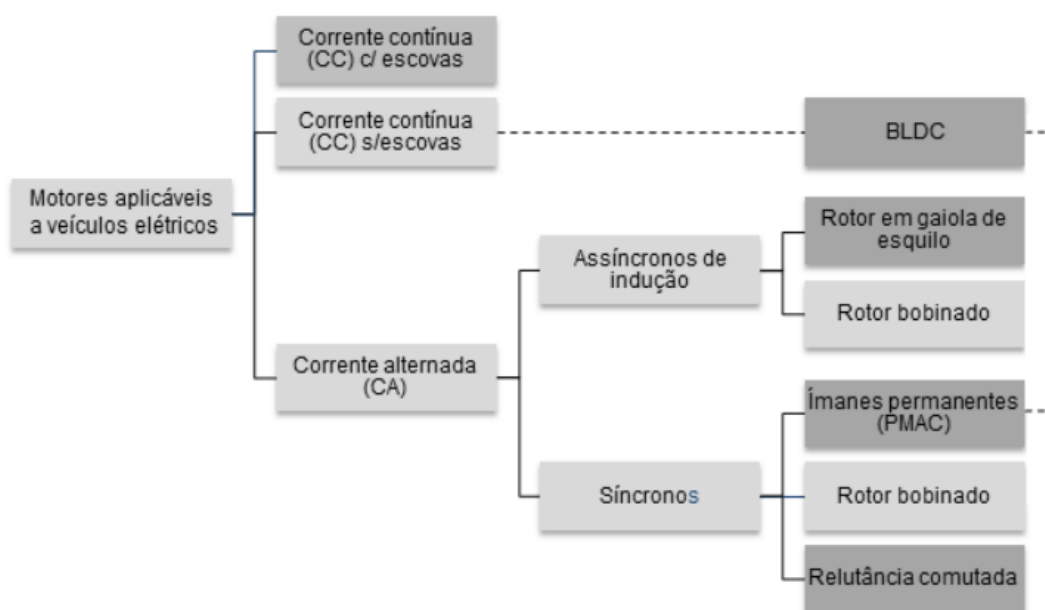
No aspecto ambiental, os VEs não produzem emissões diretas de poluentes. Como não há combustão, não se liberam gases prejudiciais. Isso representa uma vantagem particularmente importante nos centros urbanos, onde mesmo veículos a combustão menos poluentes, ou movidos por combustíveis renováveis como o etanol, ainda emitem gases tóxicos nas proximidades da população. Contudo, é essencial que as baterias dos VEs sejam descartadas de forma adequada ao final de sua vida útil para evitar impactos ambientais. (Antunes, 2018)

Por outro lado, os VEs enfrentam limitações quanto à autonomia e ao tempo de recarga. A densidade energética das baterias, medida em Wh/kg, é consideravelmente menor do que a da gasolina cerca de 60 vezes inferior. Isso significa que, para se alcançar uma autonomia semelhante à dos veículos convencionais, seria necessário um conjunto de baterias com massa impraticável e custo elevado. Por essa razão, o uso de VEs é atualmente mais viável em trajetos urbanos, sendo que, para viagens mais longas, soluções híbridas que combinem propulsão elétrica com motores a combustão são frequentemente necessárias para ampliar o alcance.

A Figura 37 apresenta um diagrama de blocos com diferentes tipos de motores elétricos, destacando em cor os mais indicados para aplicação em veículos elétricos. O motor de corrente contínua com escovas tem sido progressivamente abandonado,

principalmente por exigir manutenção frequente como a substituição das escovas e a limpeza do coletor, além do avanço dos sistemas de controle para motores de corrente alternada, como os síncronos e os de indução. Já o motor de relutância comutada, anteriormente considerado inadequado para veículos elétricos devido à sua baixa densidade de potência o que exigia motores maiores e mais pesados, passou a ser visto como uma alternativa promissora graças aos recentes avanços tecnológicos. (Freitas, 2012)

Figura 37 – Diagrama representativo motores elétricos



Fonte: Freitas (2012)

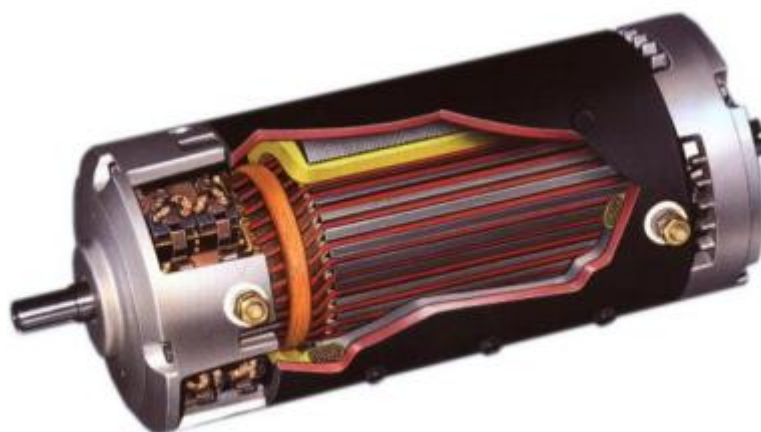
3.1.2.1 Classificações de Motores

Em geral os que são utilizados são os de corrente contínua (CC) monofásico, mas pode ser adaptado para operar com corrente alternada (CA), motivo pelo qual também é conhecido como motor universal. Quando alimentado por CA, seu

desempenho é inferior ao obtido com CC, apresentando maiores perdas, menor força eletromotriz e redução na velocidade. (Freitas, 2012)

Entre as principais vantagens desse motor estão o torque elevado mesmo em baixas rotações, uma ampla faixa de variação de velocidade e a simplicidade do controle, que pode ser realizado por meio de resistores. Contudo, esse tipo de motor possui eficiência inferior e custo mais elevado em comparação aos motores de indução, além de exigir manutenção periódica, como a substituição das escovas e a limpeza dos coletores. A Figura 38 ilustra um exemplo desse motor

Figura 38 – Motor CC com escovas



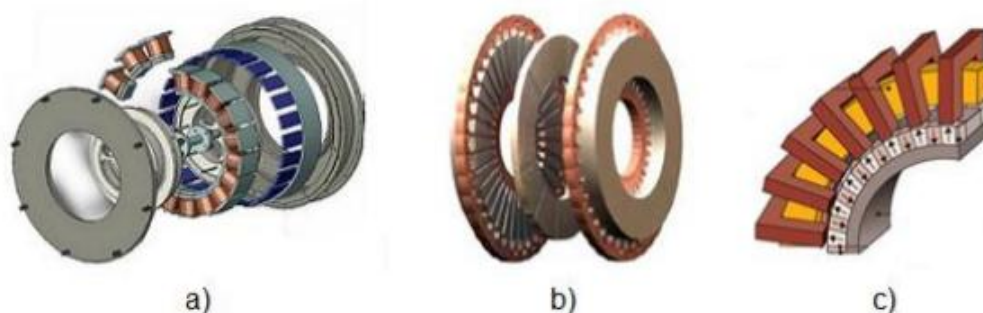
Fonte: Freitas (2012)

O motor de indução de CA opera a partir de um campo magnético girante, gerado por uma tensão alternada seja trifásica ou monofásica aplicada nos enrolamentos do estator. Esse campo rotativo induz uma força eletromotriz no rotor, fazendo com que ele gire. No entanto, a rotação do rotor ocorre com um pequeno atraso em relação ao campo magnético do estator, devido à carga imposta ao motor, característica que justifica o termo “assíncrono”. Esse desfasamento, conhecido como deslizamento, aumenta proporcionalmente à carga aplicada e, quanto maior for esse deslizamento, maiores serão as perdas por efeito Joule no rotor, resultando em uma queda na eficiência do motor. (Freitas, 2012)

O rotor desse tipo de motor pode ser do tipo gaiola de esquilo ou bobinado. Contudo, motores com rotor bobinado são pouco utilizados em veículos elétricos, pois requerem escovas e coletores, o que eleva o custo e a necessidade de manutenção.

Os motores *Permanent Magnet AC* (PMAC) são motores síncronos de corrente alternada com ímãs permanentes, podendo ser classificados como *Brushless DC* (BLDC) ou *Permanent Magnet Synchronous Motor* (PMSM). Esses motores se destacam por oferecerem elevado torque desde a partida, que pode se manter constante em uma ampla faixa de velocidades. Além disso, apresentam maior eficiência e menor tamanho em comparação com motores de indução de mesma potência. Sua principal desvantagem, no entanto, é o custo elevado, decorrente do uso de ímãs permanentes, frequentemente fabricados com materiais de terras raras como o neodímio. Os motores com ímãs permanentes também podem ser classificados quanto ao fluxo magnético, na Figura 39 são mostradas algumas dessas configurações, sendo suas divisões Motores de ímãs permanentes a) Fluxo radial; b) Fluxo axial; c) Fluxo transverso (Freitas, 2012)

Figura 39 – Configurações motores de ímãs permanentes







Fonte: Freitas (2012)

O motor de relutância comutada apresenta uma construção simples, robusta e de baixo custo. É capaz de operar em altas velocidades, possui excelente controlabilidade e um bom rendimento, além de funcionar de forma eficiente como gerador. No entanto, um dos principais inconvenientes históricos deste tipo de motor era sua baixa densidade de potência, o que exigia motores grandes e pesados fator que o tornava pouco adequado para aplicação em veículos elétricos.

Seu princípio de funcionamento é relativamente simples: o torque é gerado pela tendência natural do rotor em alinhar-se com uma posição do estator onde a indutância e o fluxo magnético gerado pelos enrolamentos do estator sejam máximos. O torque contínuo é produzido através da sincronização da excitação de cada fase com a posição do rotor.

Abaixo está a matriz de avaliação para quatro tecnologias de motores candidatos a veículos elétricos. Os valores atribuídos variam de zero a cinco, para facilitar a comparação das características de cada motor. A escolha do motor também leva em consideração a zona típica de funcionamento do motor, como ilustrado no Quadro 2, para determinar a melhor relação de transmissão ou a necessidade de adotar um sistema mecânico de variação de velocidade do tipo CVT.

Quadro 2 – Avaliação Motores para veículos elétricos

| <div>Tipo de motor</div> | <div>CC (c/escovas)</div>  | <div>Indução</div>  | <div>Ímanes permanentes</div>  | <div>Relutância comutada</div>  |
|--------------------------|---|--|---|--|
| Densidade de potência | 2,5 | 3,5 | 5 | 3,5 |
| Rendimento | 2,5 | 3,5 | 5 | 4 |
| Controlabilidade | 5 | 4 | 4 | 4 |
| Fiabilidade | 3 | 5 | 4 | 5 |
| Maturidade tecnológica | 5 | 5 | 4 | 4 |
| Custo | 4 | 5 | 3 | 4 |
| Total | 22 | 26 | 25 | 24,5 |

Fonte: Freitas (2012)

3.1.2.2 Motor na roda (in-wheel motor)

O conceito de motor incorporado diretamente na roda, também conhecido como *in-wheel* motor, não é uma novidade, mas foi impulsionado pelo crescente interesse nos veículos elétricos. Nesse sistema, o motor é acoplado diretamente à roda, eliminando a necessidade de componentes mecânicos adicionais, como rodas dentadas ou cardans, permitindo maior controle de tração, uma vez que o binário de cada roda pode ser independente. Essa configuração melhora a estabilidade do veículo, permitindo um controle mais preciso, especialmente em sistemas de estabilidade e tração.

Além disso, o *in-wheel* motor proporciona mais liberdade de design para os fabricantes, já que elimina os sistemas tradicionais de transmissão, resultando em um veículo mais leve, compacto e espaçoso. Um único modelo de motor pode ser utilizado em diferentes modelos de veículos, seja para dois ou quatro eixos, oferecendo uma grande economia de escala. Em termos de aplicação, esse tipo de motor pode incluir, além do motor de acionamento direto, os sistemas de suspensão, direção e até o sistema de freios, todos integrados no espaço da roda. Isso simplifica a construção do veículo e pode eliminar a necessidade de partes como engrenagens e até rolamentos, o que contribui para um design mais eficiente e compacto. Um exemplo visual desse conceito seria ver um motor de combustão interna ou um motor elétrico aplicados nas rodas de uma bicicleta.

3.1.2.3 Arrefecimento motores

Como relembra Freitas (2012) os motores elétricos geram calor devido a perdas elétricas e mecânicas, sendo este aumento de temperatura diretamente proporcional à carga e à velocidade de rotação. Em termos gerais, existem três grandes tipos de motores quanto ao arrefecimento: máquinas abertas, máquinas fechadas com arrefecimento a ar e máquinas fechadas com arrefecimento a líquido.

Nas máquinas abertas, o ar circula livremente pelo interior da máquina, agitado pelo rotor, e o calor gerado é dissipado por convecção através das aberturas para o

ambiente externo. Já nas máquinas fechadas, as carcaças são feitas de materiais que conduzem bem o calor, facilitando sua dissipação. Quando o arrefecimento é feito por ar, a superfície da máquina é projetada com alhetas para aumentar a área de dissipação, sendo o arrefecimento realizado por um ventilador. Este ventilador pode ser acoplado ao eixo do motor ou ser independente, e, em alguns casos, pode ter variação de velocidade conforme a temperatura do motor, ajudando a regular o processo de resfriamento.

As carcaças das máquinas fechadas são feitas de materiais com boa condutividade térmica, permitindo a condução eficiente do calor gerado para fora da máquina. Quando o sistema de arrefecimento é realizado por ar, a superfície da carcaça é projetada com alhetas, o que aumenta a área de dissipação de calor. A remoção do calor é realizada por um ventilador, que pode ser acoplado ao eixo do motor ou funcionar de forma independente. Além disso, em alguns casos, o ventilador pode ter uma variação de velocidade, ajustando-se conforme a temperatura do motor, o que melhora o controle térmico e a eficiência do sistema de arrefecimento

3.1.2.4 Baterias

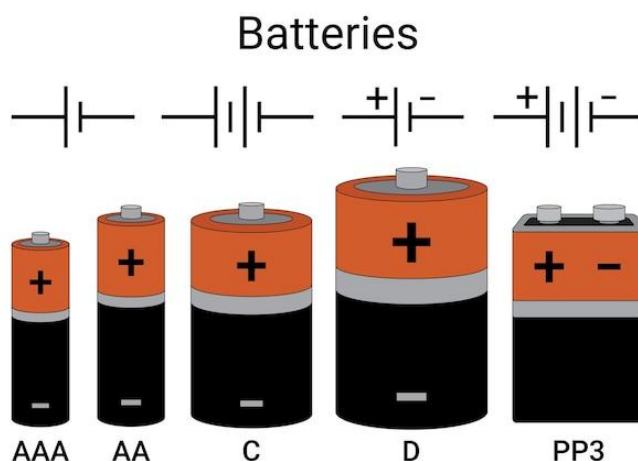
Uma bateria é um dispositivo composto por uma ou várias células unitárias que convertem energia química em energia elétrica e vice-versa. As baterias podem ser divididas em dois grandes grupos: as primárias e as secundárias, também conhecidas como recarregáveis.

Para Antunes (2018) as baterias primárias não podem ser recarregadas, pois o processo químico de geração de energia é irreversível. Exemplos incluem pilhas comuns, como as de zinco-carbono e pilhas alcalinas, que estão disponíveis em diversas tensões e tamanhos (como AA, A, C, D, etc.).

A Figura 40 apresentada ilustra os diferentes tipos de pilhas comumente utilizadas em aparelhos eletrônicos, organizadas em ordem crescente de tamanho e capacidade: AAA, AA, C, D e PP3 (também conhecida como bateria de 9 volts). Cada tipo é representado com sua simbologia correspondente no circuito elétrico, destacando os polos positivo (+) e negativo (–).

A representação visual ajuda a compreender tanto as dimensões físicas dessas pilhas quanto sua aplicação em esquemas de ligação elétrica, sendo útil para fins didáticos e técnicos.

Figura 40 – Figura Ilustrativa Baterias



Fonte: Freepik (2025)

Já as baterias secundárias podem ser recarregadas múltiplas vezes, desde que atendam a requisitos como tensão, temperatura e corrente de recarga. Exemplos de baterias secundárias incluem as baterias de automóveis (geralmente de chumbo-ácido), de computadores portáteis e de telefones celulares (geralmente de níquel-hidreto metálico ou lítio-íon), além das antigas pilhas de níquel-cádmio recarregáveis.

Uma bateria para um veículo elétrico deve atender a uma série de requisitos essenciais para garantir um desempenho eficiente e uma vida útil prolongada. A densidade energética é um fator crucial, pois determina a quantidade de energia que a bateria pode armazenar, o que influencia diretamente a autonomia do veículo. Quanto maior a densidade energética, maior a quantidade de energia armazenada em um peso ou volume reduzido, o que é fundamental para otimizar a performance do veículo. Além disso, a capacidade de descarga da bateria precisa ser adequada à potência exigida pelo veículo, permitindo que o motor elétrico receba a energia necessária, especialmente em situações de aceleração intensa ou quando o veículo enfrenta subidas íngremes. (Freitas, 2012)

A segurança e a confiabilidade da bateria também são determinantes, uma vez que a tecnologia deve ser capaz de operar sem riscos de falhas graves, como curtos-circuitos, sobrecarga ou superaquecimento. Um sistema de proteção eficiente é essencial para garantir que o desempenho da bateria seja estável ao longo do tempo. A vida útil da bateria é outro aspecto importante, pois baterias de longa durabilidade reduzem o custo total de manutenção do veículo, já que diminuem a necessidade de substituições frequentes. O custo da bateria, por sua vez, ainda representa um grande obstáculo para a adoção de veículos elétricos em larga escala, portanto, é importante que ela seja acessível, tanto em termos de fabricação quanto de substituição.

Além disso, o impacto ambiental da bateria deve ser minimizado, tanto na fase de produção quanto no processo de descarte. O uso de materiais recicláveis e a minimização de substâncias prejudiciais ao meio ambiente são aspectos fundamentais para tornar os veículos elétricos mais sustentáveis.

Por fim, para complementar essas considerações, foi anexada uma tabela que descreve as principais características dos tipos de baterias mais comumente usadas em veículos elétricos, como mostrado no Quadro 3.

Quadro 3 – Aplicações típicas automotores de baterias

| | Aplicações típicas |
|---------------------------|---|
| Chumbo-ácido | Submarinos, automóveis, EVs, cadeiras de rodas, <i>scooter</i> es, <i>E-Bikes</i> e unidades UPS |
| NiCd | Aparelhos eletrônicos, comandos, brinquedos, telemóveis, máquinas de furar portáteis e sinalização de emergência |
| NiMH | EVs, HEVs, locomotivas, computadores portáteis, telemóveis, aparelhos elétricos, instrumentos e equipamentos médicos |
| Li-ion | EVs, Computadores portáteis, telemóveis, máquinas fotográficas, aparelhos rádio modelismo e MP3 |
| LiFePO₄ | EVs, motos e bicicletas elétricas, <i>SegWays</i> , <i>E-Bikes</i> , Computadores portáteis e aparelhos rádio modelismo |

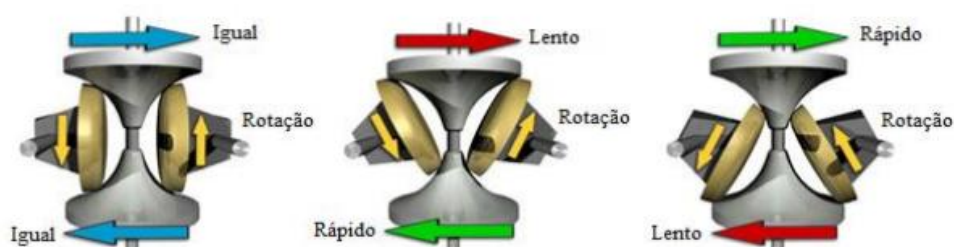
Fonte: Freitas (2012)

3.1.2.5 Recuperação de Energia Cinética (KERS)

O conceito *Kinetic Energy Recovery System* (KERS) é uma tecnologia que busca recuperar a energia gerada durante desacelerações ou descidas, para reutilizá-la nas acelerações ou subidas subsequentes. O sistema utiliza um volante de inércia (flywheel), que armazena essa energia cinética gerada durante os momentos de desaceleração e, quando necessário, a transfere novamente para as rodas motrizes para fornecer tração ao veículo. (Freitas, 2012)

O KERS pode incorporar um motor-gerador, acoplado ao volante de inércia, e ultra condensadores para o armazenamento elétrico da energia recuperada. Em alguns sistemas, pode simplesmente reutilizar a energia do volante de inércia, transferindo-a diretamente para a tração do veículo, reduzindo assim as perdas energéticas. Normalmente, o volante de inércia é integrado a uma transmissão, que pode ser do tipo CVT toroidal por fricção, como ilustrado na Figura 41, oferecendo uma solução eficiente para melhorar o rendimento energético do veículo.

Figura 41 – Exemplo de funcionamento KERS



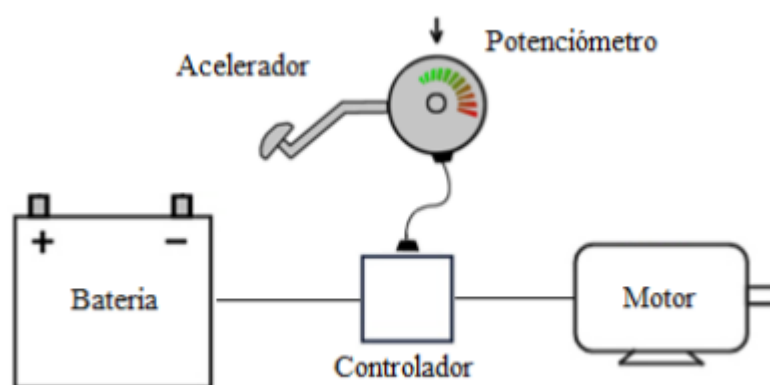
Fonte: Freitas (2012)

3.1.2.6 Controladores

De acordo com Silva (2020) os controladores desempenham um papel fundamental nos VEs, sendo responsáveis por gerenciar a interação entre o condutor e o sistema de tração. Por exemplo, os sinais gerados pelos pedais do acelerador, que são ativados pelo condutor, são recebidos pelo controlador, que, por sua vez, atua no controle do conversor de tração. Isso permite regular os fluxos de energia entre o sistema de armazenamento de energia e o motor elétrico.

Além disso, o controlador ajusta suas ações com base nos sinais recebidos do sistema de gestão de energia, como ilustrado no esquema da Figura 42.

Figura 42 – Esquema de funcionamento de controladores



Fonte: Silva (2020)

Novamente de acordo Freitas (2012) a função do controlador vai além do simples controle da aceleração e desaceleração. Ele também é responsável por funções como o controle do modo de frenagem regenerativa, garantindo que a energia gerada durante a desaceleração seja armazenada de volta nas baterias. Outra função importante é a monitoração dos estados do sistema de armazenamento de energia, garantindo que as baterias estejam sempre dentro das condições ideais de operação. Além disso, o controlador regula as operações de reabastecimento, garantindo uma gestão eficiente da energia no sistema.

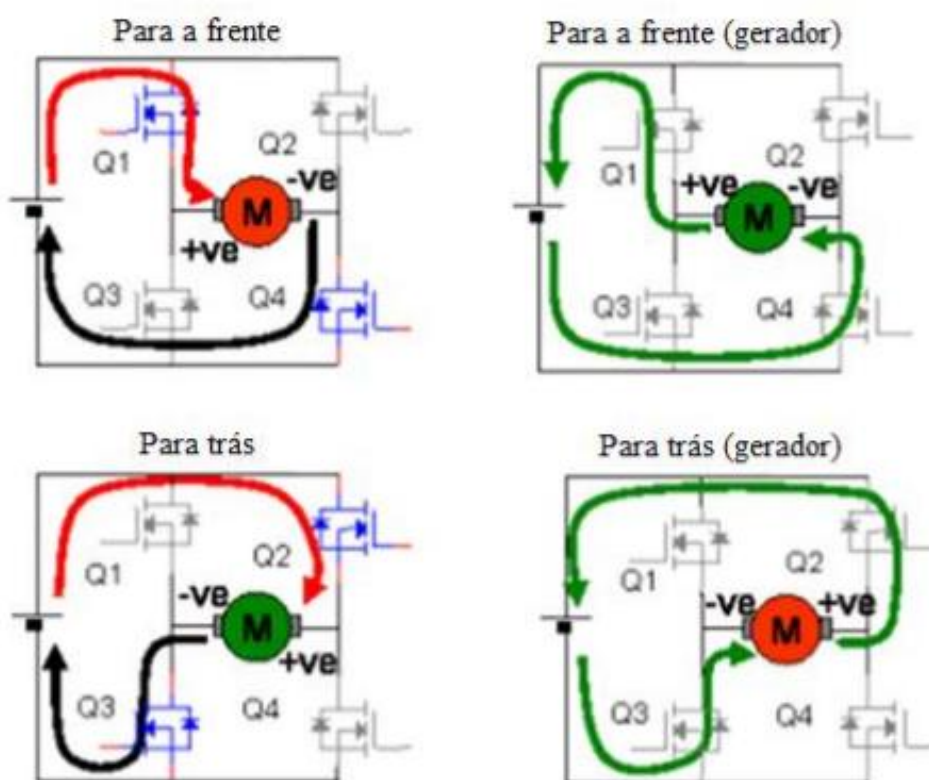
Nos primeiros automóveis elétricos, equipados com motores de CC, os controladores eram simples e usavam potenciômetros. A resistência desses potenciômetros variava de acordo com a posição do pedal do acelerador, regulando o fluxo de corrente entre as baterias e o motor. Esse sistema permitia o controle da velocidade do veículo, mas apresentava baixos rendimentos devido ao efeito Joule nas resistências, o que resultava em perdas de energia.

Atualmente, muitos controladores de veículos elétricos utilizam a modulação por largura de pulso *Pulse-Width Modulation* (PWM), que permite uma gestão mais eficiente da energia. Esses controladores desempenham várias funções, incluindo a

conversão de tensão contínua em alternada, o que os torna conhecidos como inversores, já que eles "invertem" o sinal da tensão. Além disso, esses controladores regulam o fluxo de corrente entre o motor e a bateria, são responsáveis pela inversão da rotação do motor (para a marcha-ré) e possibilitam a conversão do motor em gerador para a travagem regenerativa.

Uma configuração comum para os controladores de CC é a ponte H, que utiliza quatro quadrantes. Com base na lei das malhas e dos nós, essa configuração permite alterar a polaridade e o sentido da corrente, possibilitando que o motor gire para frente, para trás e funcione como gerador em ambos os sentidos. No entanto, o quadrante de funcionamento como gerador durante a marcha ré não é amplamente utilizado na prática, como ilustrado na Figura 43.

Figura 43 – Modos de utilização dos controladores



Fonte: Freitas (2012)

3.1.2.7 Particularidades tecnológicas no uso em caminhões

Os caminhões elétricos diferem dos veículos leves não apenas pelo tamanho e capacidade de carga, mas também por diversas tecnologias e componentes que foram desenvolvidos especificamente para atender às suas necessidades operacionais. Desde sistemas de resfriamento aprimorados até motores mais potentes e sofisticados, essas inovações são essenciais para garantir que os caminhões elétricos sejam viáveis para aplicações comerciais de longa distância e alta carga.

Sistemas de Resfriamento de Baterias

Para Stopfer et al (2021) uma das principais diferenças entre caminhões elétricos e veículos leves está no sistema de resfriamento das baterias. Devido ao uso de pacotes de baterias significativamente maiores, os caminhões elétricos enfrentam um aquecimento mais intenso durante a operação. Para evitar o superaquecimento e garantir a durabilidade das baterias, esses veículos são equipados com sistemas de resfriamento líquido altamente avançados, que mantêm a temperatura dentro de uma faixa ideal e evitam perdas de eficiência e degradação prematura das células da bateria

Nos caminhões elétricos, a necessidade de um resfriamento eficiente é ainda mais crítica devido à alta demanda energética em situações como subidas íngremes e percursos longos. Em comparação, os veículos leves geralmente operam com sistemas de resfriamento a ar ou líquido menos robustos, pois suas exigências energéticas são menores. (DNIT, 2006)

Nos veículos pesados elétricos, o controle térmico não se limita apenas à refrigeração do motor ou da bateria, mas abrange todo o sistema de propulsão, incluindo inversores e cabos de alta tensão. A variação de temperatura em longas jornadas ou em operações severas pode comprometer o desempenho e a segurança do conjunto, exigindo soluções mais robustas, como sistemas de resfriamento líquido com controle ativo de temperatura. Esse cuidado garante não apenas a estabilidade do sistema, mas também otimiza a eficiência energética em condições extremas, o que é fundamental para aplicações comerciais de grande porte.

De acordo com o site da empresa TKT, especializada em soluções de refrigeração e controle térmicos em equipamentos eletrônicos há uma imagem indicando diversos produtos de aplicação e faixa de operação de funcionamento do seu produto, observável na Figura 44.

Figura 44 – Equipamento Refrigerador TKT e suas aplicações



Fonte: TKT site web (2025)

Suspensão Reforçada e Estrutura Adaptada

Dado o peso adicional das baterias e a necessidade de transportar cargas elevadas, os caminhões elétricos possuem uma suspensão reforçada, projetada para lidar com essas exigências sem comprometer a dirigibilidade. Diferentemente dos veículos leves, que utilizam suspensões convencionais projetadas para o conforto dos passageiros, os caminhões elétricos empregam sistemas pneumáticos e hidráulicos aprimorados para suportar cargas pesadas e manter a estabilidade em diferentes tipos de terreno. (Stopfer et al, 2021)

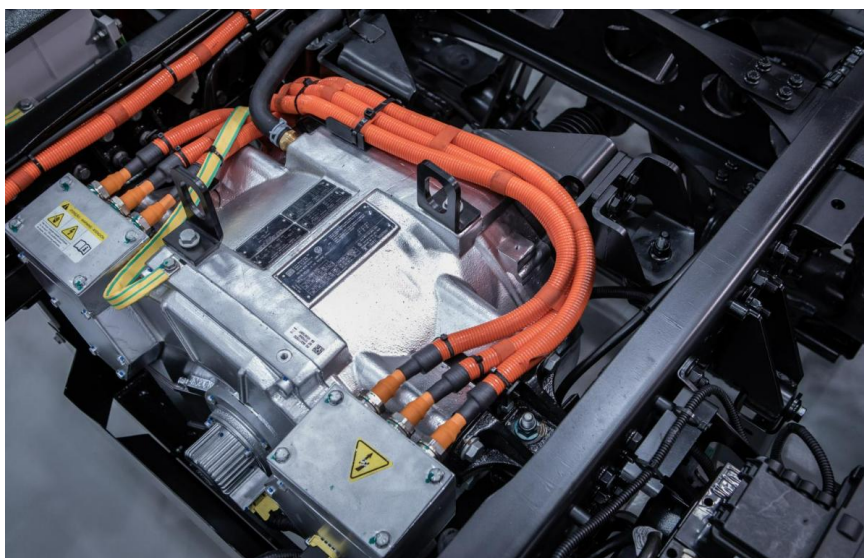
Além disso, o chassi dos caminhões elétricos é adaptado para suportar a distribuição de peso das baterias, que precisam ser posicionadas estrategicamente para otimizar a aerodinâmica e o desempenho. Essa configuração difere dos veículos de passeio, onde o posicionamento das baterias é feito com foco na compactação do espaço interno. (DNIT, 2006)

Motores Potentes e Redundantes

Enquanto veículos elétricos leves geralmente utilizam um único motor elétrico para tração, os caminhões elétricos podem possuir múltiplos motores distribuídos ao longo do eixo para melhor controle e desempenho. Isso é particularmente importante para garantir torque suficiente para arrancadas sob carga máxima e otimizar a eficiência energética em subida. (Stopfer et al, 2021)

Os motores elétricos de caminhões também possuem sistemas redundantes para evitar falhas operacionais. Se um motor apresentar problemas, o veículo pode continuar operando com os motores remanescentes, garantindo maior segurança e confiabilidade em trajetos longos, como observado na Figura 45. (DNIT, 2006)

Figura 45 – Exemplar motor e-Delivery



Fonte: Site VW (2025)

Sistemas de Gerenciamento de Energia Inteligente

Os caminhões elétricos são equipados com sofisticados sistemas de gerenciamento de energia, que monitoram em tempo real o consumo energético e otimizam o uso da bateria de acordo com a carga transportada, inclinação da estrada e velocidade do veículo. Esses sistemas são mais complexos do que os encontrados em veículos leves, pois precisam lidar com uma variação muito maior de demandas operacionais (Stopfer et al, 2021).

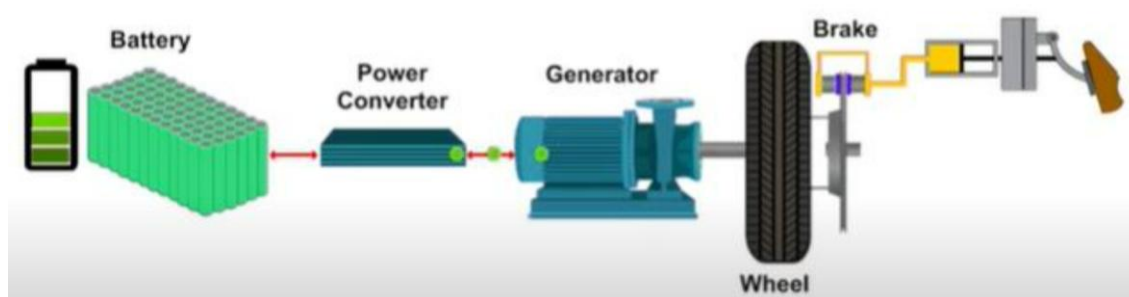
Além disso, algumas frotas utilizam algoritmos de inteligência artificial para prever o consumo energético com base no trajeto planejado, ajustando dinamicamente a distribuição de potência e recomendando pontos ideais de recarga. Isso contribui para maximizar a eficiência e reduzir os custos operacionais das empresas que operam esses caminhões. (DNIT, 2006)

Frenagem Regenerativa Aprimorada

A frenagem regenerativa, presente em todos os veículos elétricos, é particularmente mais avançada em caminhões elétricos devido ao peso e à energia cinética envolvida em sua operação. Quando o caminhão desacelera ou desce uma ladeira, o sistema de frenagem regenerativa converte essa energia em eletricidade, armazenando-a na bateria para ser reutilizada. Nos caminhões, esse sistema é dimensionado para lidar com cargas muito superiores às dos veículos leves, o que aumenta significativamente sua eficiência (Stopfer et al, 2021).

Alguns modelos de caminhões elétricos utilizam sensores inteligentes que ajustam automaticamente a intensidade da frenagem regenerativa de acordo com a carga transportada e a inclinação do terreno, garantindo máxima recuperação de energia sem comprometer a segurança. (DNIT, 2006). A Figura 46 demonstra um sistema de frenagem regenerativa e todos seus componentes.

Figura 46 – Figura esquemática de funcionamento para frenagem regenerativa



Fonte: Site “amocarros” (2025)

Controle de Carga Inteligente

Os caminhões elétricos também possuem sistemas avançados de controle de carga, que ajudam a otimizar a distribuição do peso da carga transportada e ajustar automaticamente a suspensão e a tração para garantir melhor estabilidade e eficiência energética. Esse tipo de tecnologia é crucial para evitar desperdício de energia e maximizar a autonomia do veículo. (Stopfer et al, 2021)

Além disso, em algumas frotas comerciais, caminhões elétricos estão sendo equipados com sistemas de carregamento dinâmico, permitindo que a bateria seja parcialmente recarregada em estações ao longo do trajeto sem precisar de paradas prolongadas. (DNIT, 2006)

Os caminhões elétricos são equipados com uma série de inovações tecnológicas e estruturais que os diferenciam dos veículos leves, tornando-os mais eficientes e adequados para aplicações comerciais. Desde sistemas de resfriamento aprimorados e motores redundantes até gerenciamento inteligente de energia e aerodinâmica otimizada, essas tecnologias garantem que os caminhões elétricos possam operar com segurança, eficiência e competitividade no mercado de transporte. À medida que essas inovações continuam a evoluir, espera-se que a adoção de caminhões elétricos cresça cada vez mais, reduzindo o impacto ambiental do transporte de cargas e melhorando a viabilidade econômica dessa tecnologia.

3.1.3 Aplicações deste tipo de veículo na atualidade

Nos últimos anos, a logística e o transporte de cargas passaram por transformações significativas devido ao avanço tecnológico, à crescente demanda por eficiência e às preocupações ambientais. Com o crescimento do comércio eletrônico, a necessidade de entregas rápidas e seguras impulsionou o desenvolvimento de veículos de carga mais modernos e adaptados às novas exigências do setor. Além disso, políticas ambientais mais rigorosas e metas globais de redução de emissões de carbono levaram à adoção de veículos de carga elétricos e híbridos como alternativas sustentáveis aos modelos tradicionais movidos a combustíveis fósseis.

A eletrificação no setor de transporte de cargas tem ganhado destaque como uma solução eficiente para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e minimizar impactos ambientais. O avanço das baterias de alta capacidade, a melhoria da infraestrutura de recarga e os incentivos governamentais têm acelerado a adoção dessa tecnologia. Grandes fabricantes vêm investindo em caminhões elétricos capazes de atender diferentes demandas logísticas, desde entregas urbanas até operações de longa distância.

Entre os principais modelos elétricos disponíveis no mercado, destacam-se o VW e-Delivery, voltado para entregas urbanas, o Mercedes-Benz eActros, desenvolvido para transporte regional, e o Volvo FH Electric, que representa uma solução para operações de longa distância. Esses veículos, que serão explorados em detalhes posteriormente, demonstram como a eletrificação está moldando o futuro do transporte de cargas, tornando-o mais eficiente, sustentável e alinhado às novas demandas da indústria.

3.1.3.1 VW e-Delivery

Conforme site oficial da Volkswagen o VW e-Delivery é o primeiro caminhão 100% elétrico desenvolvido pela Volkswagen Caminhões e Ônibus no Brasil, marcando um avanço significativo para o transporte sustentável de cargas urbanas. O modelo foi projetado para atender às demandas de eficiência energética, redução de emissões e adaptação às exigências ambientais das grandes cidades, conforme visualizado o exemplo na Figura 47.

Figura 47 – VW eDelivery



Fonte: Site VW (2023)

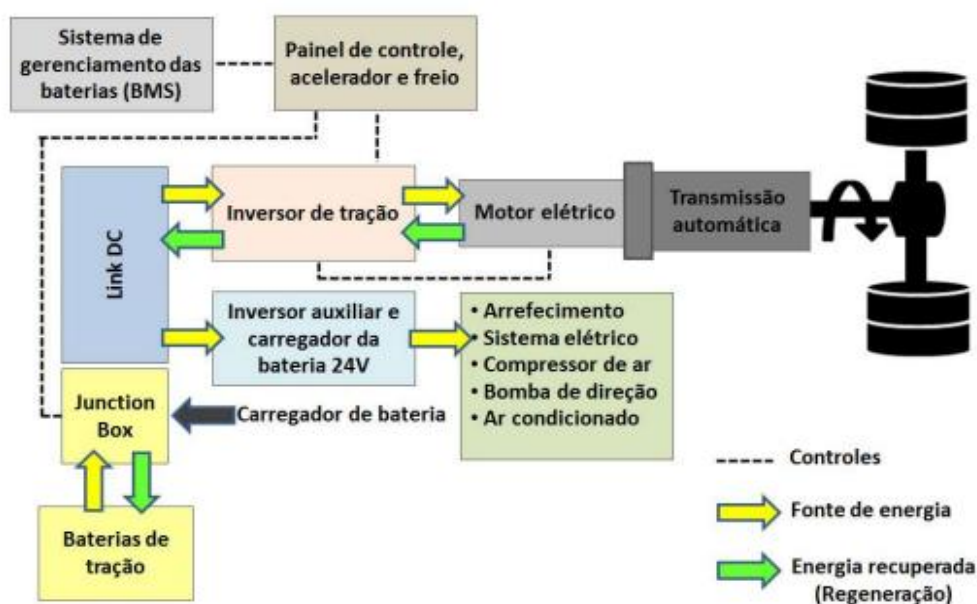
O VW e-Delivery foi criado especificamente para operações urbanas, oferecendo uma alternativa viável para empresas que buscam reduzir sua pegada de

carbono. Entre seus principais diferenciais estão a emissão zero de poluentes, a operação silenciosa e os custos operacionais reduzidos em comparação aos caminhões movidos a diesel.

Já de acordo com o documento da Associação Brasileira de Engenharia Automotiva (AEA) de 2021 o caminhão conta com tecnologias avançadas, como frenagem regenerativa, que melhora a eficiência energética e prolonga a autonomia da bateria. Ele é indicado para setores como distribuição urbana de cargas, logística de última milha e transporte de mercadorias sensíveis a emissões, sendo uma opção viável para operar em zonas de restrição a veículos a combustão.

O VW e-Delivery possui um conjunto de componentes mecânicos e elétricos desenvolvidos para garantir desempenho, eficiência e confiabilidade. Entre suas principais especificações estão. Podemos ver na Figura 48 uma ilustração sobre a esquemática de funcionamento do e_delivery e algumas de suas especificações (Site VW, 2023)

Figura 48 – Esquema sistemas VW eDelivery



Fonte: Site VW (2025)

- Motor elétrico: WEG AL160, com potência máxima de 300 kW (408 CV) e torque de 2.150 Nm.
- Transmissão: Automática Allison T2100 de 6 velocidades.

- Baterias: Tecnologia de Íon-Lítio base Ferro-Fosfato (LiFePO₄), com capacidade para autonomia entre 100 km e 200 km, dependendo da configuração.
- Frenagem regenerativa: Capacidade de recuperar entre 15% a 30% da energia utilizada durante a operação.
- Peso bruto total (PBT): 10,7 toneladas.
- Recarga:
 - Rápida: 30% da carga em 15 minutos.
 - Lenta: Carga total em cerca de três horas

Comparado aos caminhões a diesel, o VW e-Delivery pode reduzir os custos operacionais em até 45% apenas no consumo de energia. Quando se considera a energia recuperada pela frenagem regenerativa, essa economia pode chegar a 52%.

Além da economia financeira, o modelo contribui para a redução significativa das emissões de CO₂. Estima-se que, em aplicações urbanas com uma quilometragem média de 50 km/dia, a emissão de CO₂ seja reduzida em 81%, o que representa 23 toneladas a menos de carbono liberadas por ano, quando comparado a um caminhão equivalente a diesel. (AEA, 2021)

Segundo informações do site oficial VW o e-Delivery se tornou um marco no setor de caminhões elétricos, sendo destaque em eventos como a Fenatran 2017 e no Innovation Day da Volkswagen. Empresas de logística e grandes frotistas vêm testando e adotando o modelo, reforçando sua posição como uma solução viável para o transporte sustentável.

O desenvolvimento do e-Delivery coloca a Volkswagen Caminhões e Ônibus na vanguarda da eletrificação no Brasil, demonstrando o potencial da indústria nacional na transição para um transporte mais limpo e eficiente. (AEA, 2021)

O VW e-Delivery representa um novo paradigma para o transporte urbano de cargas, combinando sustentabilidade, eficiência energética e inovação tecnológica. Seu impacto no setor indica que a eletrificação do transporte de cargas é um caminho sem volta, e o modelo se destaca como um dos pioneiros nessa transformação. (Site VW, 2025)

3.1.3.2 Mercedes-Benz eActros 600

Diante de informações presentes no site da Daimler, divisão de pesados da Mercedes de 2024 o eActros 600 é um caminhão elétrico de longa distância desenvolvido pela Mercedes-Benz Trucks, projetado para atender às crescentes demandas por eficiência, autonomia e redução de emissões no setor de transporte de cargas. Sua introdução no mercado reflete o compromisso da fabricante em fornecer alternativas sustentáveis para o transporte rodoviário pesado.

- **Autonomia e Eficiência:** O eActros 600 possui uma autonomia de aproximadamente 500 quilômetros sem necessidade de recarga, permitindo operações de longa distância com eficiência energética e sem comprometer a produtividade (DAIMLER TRUCK, 2024).
- **Baterias e Vida Útil:** Equipado com baterias de fosfato de ferro-lítio (LFP), o caminhão não utiliza níquel ou cobalto, aumentando sua sustentabilidade. Essas baterias possuem uma vida útil estimada em até 1.200.000 quilômetros, garantindo durabilidade e economia operacional para frotistas (MERCEDES, 2024).
- **Sistema de Propulsão:** O eActros 600 conta com um eixo elétrico inovador, que oferece potência contínua de 400 kW e potência máxima de 600 kW, assegurando desempenho confiável em diferentes condições operacionais (MERCEDES, 2024).
- **Carregamento Rápido:** Utilizando tecnologia de carregamento em megawatts (MCS), o veículo pode recarregar de 20% a 80% em aproximadamente 30 minutos, reduzindo significativamente o tempo de inatividade entre viagens (MERCEDES, 2024).

Já para o site Reuters de avaliações automotivas, o eActros 600 está sendo adotado por grandes empresas de logística para operações de alta quilometragem. Um exemplo disso é a Amazon, que anunciou a aquisição de 200 unidades do modelo para integrar sua frota de transporte na Alemanha e no Reino Unido a partir de 2025. Essa aquisição representa um dos maiores pedidos de caminhões elétricos pesados da empresa e reforça seu compromisso com a redução de emissões de carbono na cadeia de suprimentos.

Além disso, a Mercedes-Benz conduziu uma extensa fase de testes, na qual o caminhão percorreu mais de 15.000 quilômetros em toda a Europa, demonstrando sua viabilidade operacional e resistência para enfrentar diferentes cenários logísticos. Os resultados desses testes indicam que o eActros 600 é uma solução confiável para empresas que buscam eficiência energética e sustentabilidade. (DAIMLER Truck, 2024)

Na Figura 49 podemos observar os caminhões utilizados neste significativo teste, em uma fotografia comemorativa divulgada no próprio site da Daimler.

Figura 49 – Mercedes Benz eActros 600



Fonte: (MERCEDES, 2024).

O Mercedes-Benz eActros 600 se destaca como uma solução inovadora no setor de transporte de cargas, oferecendo uma combinação de autonomia estendida, carregamento rápido e tecnologias sustentáveis. Sua adoção por empresas de grande porte, como a Amazon, evidencia a crescente aceitação dos caminhões elétricos no mercado global (REUTERS,2024).

A Mercedes-Benz Trucks, com esse lançamento, reafirma sua liderança na eletrificação do transporte pesado, promovendo um futuro mais sustentável e eficiente para a indústria logística. (DAIMLER Truck, 2024)

3.1.3.3 Volvo FH Eletric

Conforme site da Volvo de 2022 o FH Electric é um dos principais avanços na eletrificação do transporte de cargas pesadas, combinando a confiabilidade e robustez da linha FH com tecnologia de ponta para reduzir as emissões de carbono. A Volvo Trucks tem investido fortemente na eletrificação como uma solução viável para operações de longa distância, reforçando seu compromisso com um futuro mais sustentável.

Com a crescente necessidade de descarbonização do setor de transportes, a Volvo aposta no FH Electric como um passo fundamental para atender às demandas ambientais e operacionais do mercado global.

Na Figura 50 ilustramos esse imponente produto, com uma imagem disponibilizado no próprio site oficial da VOLVO.

Figura 50 – Volvo FH Eletric



Fonte: VOLVO Group (2024)

Algumas das principais características deste modelo são:

Autonomia Estendida: O Volvo FH Electric contará com uma versão capaz de percorrer até 600 km com uma única carga, o que representa um marco para caminhões elétricos pesados. Esse modelo será lançado na segunda metade de 2025.

Essa autonomia ampliada se deve, em grande parte, ao novo conjunto de baterias de maior capacidade, otimizadas para melhorar a eficiência energética e garantir uma operação mais confiável em percursos longos. (Volvo Group, 2024)

Tecnologia de Eixo Elétrico: A introdução de um eixo eletrônico inovador permite a integração do motor, caixa de câmbio e eixo em um único sistema, aumentando a eficiência energética e permitindo maior capacidade de bateria. Esse design modular reduz o peso do caminhão e melhora a distribuição da carga, tornando-o mais eficiente e alinhado com as necessidades logísticas modernas. (Volvo Group, 2024)

Eficiência Operacional: O caminhão mantém um desempenho estável, mesmo sob condições de alta carga, garantindo aceleração contínua e operação silenciosa, sem vibrações excessivas, tornando-se uma alternativa viável aos caminhões a diesel. Além disso, a Volvo investiu em um sistema avançado de regeneração de energia, que reaproveita a energia gerada durante as frenagens para aumentar a autonomia e reduzir o consumo geral de energia. (Volvo Trucks, 2022)

Capacidade de Carga e Configurações: O FH Electric está disponível em diferentes configurações de eixos e capacidades de carga para atender às diversas demandas da indústria de transporte. A Volvo projetou o caminhão para manter a robustez e a capacidade de carga de seus equivalentes a diesel, tornando-o uma opção realista para empresas que buscam reduzir suas emissões sem comprometer a produtividade. (Volvo Group, 2024)

Sustentabilidade e Redução de Emissões: Além do desempenho, o FH Electric é um dos modelos mais avançados em termos de sustentabilidade. A Volvo estima que, ao longo de sua vida útil, o caminhão pode reduzir em mais de 50% as emissões de CO₂ quando comparado a um modelo equivalente a diesel, considerando a matriz energética europeia atual. Isso torna o modelo uma peça-chave para empresas que buscam atingir metas de sustentabilidade e reduzir a pegada de carbono de suas operações. (Volvo Group, 2024)

De acordo com site da Volvo de 2023, o volvo FH Eletric recebeu o prêmio de "Caminhão Internacional do Ano" tornando-se o primeiro caminhão elétrico a receber essa premiação, concedida por um júri formado por 24 jornalistas especializados de revistas europeias do setor de transporte. Essa conquista destaca não apenas a

qualidade do veículo, mas também a confiança do mercado na tecnologia elétrica como uma alternativa viável para transporte pesado.

O júri destacou não apenas a performance e confiabilidade do modelo, mas também sua contribuição para a transição energética e a sustentabilidade do setor de transporte rodoviário. Empresas ao redor do mundo vêm demonstrando interesse no modelo, e diversas frotas comerciais já começaram a testá-lo em operações reais, comprovando sua viabilidade operacional e competitividade com os modelos tradicionais movidos a combustíveis fósseis.

O Volvo FH Electric representa um avanço significativo na eletrificação do transporte de cargas pesadas, oferecendo maior autonomia, eficiência operacional e reconhecimento internacional. Com um projeto inovador e soluções tecnológicas avançadas, a Volvo reafirma sua liderança na transição para um transporte mais sustentável, destacando-se como referência na indústria. A crescente aceitação dos caminhões elétricos no mercado e a expansão da infraestrutura de recarga demonstram que a eletrificação do setor de transportes pesados está se tornando uma realidade, e o FH Electric desempenha um papel crucial nesse cenário. (Volvo Group, 2024)

3.2 Uso da tecnologia GNV nos veículos pesados

Nas últimas décadas, o GNV tem se destacado como uma alternativa promissora aos combustíveis convencionais. Inicialmente restrito ao uso industrial e doméstico, o gás natural passou a ser reconhecido como uma solução viável para o transporte, motivado tanto por sua disponibilidade quanto pelos benefícios econômicos e ambientais. O aumento do interesse pelo GNV reflete uma tendência global na busca por alternativas de abastecimento mais sustentáveis e acessíveis.

A inserção do GNV no setor automotivo começou a ganhar força em países como Argentina e Itália, onde surgiram os primeiros veículos adaptados. No Brasil, esse movimento ganhou corpo nos anos 1990, momento em que avanços tecnológicos e políticas de incentivo viabilizaram a adoção do combustível. Como pontua Zarzur (2005), a introdução do GNV no país foi parte de uma estratégia para

diversificar a matriz energética e reduzir a dependência dos combustíveis fósseis tradicionais.

A valorização do GNV também encontra respaldo em eventos históricos, como a crise do petróleo da década de 1970, que forçou diversos países a repensarem suas fontes de energia. Devido à sua abundância e ao custo relativamente baixo, o gás natural se apresentou como uma alternativa viável. Além disso, conforme destacam Reis & Almeida. (2021), o GNV oferece benefícios ambientais expressivos, com uma emissão de poluentes consideravelmente menor que a da gasolina e do diesel.

Ao longo do tempo, crises econômicas e políticas têm impactado diretamente o setor energético, acelerando investimentos em fontes alternativas. Durante o embargo petrolífero de 1973, que levou à disparada nos preços do petróleo, o Brasil intensificou sua busca por soluções autônomas de energia. Inicialmente com o etanol e, posteriormente, com o gás natural, foram implementadas medidas para reduzir a vulnerabilidade energética do país e promover opções viáveis para o transporte.

Nos anos 2000, novas instabilidades no mercado global como as sanções econômicas impostas a grandes produtores de petróleo. Nesse contexto, a infraestrutura voltada ao GNV no Brasil passou por um processo significativo de expansão, impulsionado tanto por políticas públicas de incentivo quanto pelo aumento da frota de veículos convertidos.

Além dos aspectos econômicos e geopolíticos, políticas ambientais e regulamentações específicas também desempenharam papel crucial na consolidação do GNV como alternativa energética. Segundo a análise de Zarzur (2005), iniciativas como o Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural (CONPET), criado em 1991, e o Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV), instituído em 2008, contribuíram para a promoção da eficiência energética e para o estímulo à adoção de combustíveis menos poluentes, viabilizando o avanço de tecnologias voltadas ao uso do gás natural nos transportes.

Do ponto de vista ambiental, o GNV apresenta vantagens notáveis. Composto majoritariamente por metano, sua queima é mais limpa em comparação a outros combustíveis fósseis. Zarzur (2005) destaca que o uso do GNV pode reduzir significativamente a emissão de poluentes como o CO, CO₂ e os óxidos de nitrogênio

(NO_x), agentes que contribuem tanto para o aquecimento global quanto para a deterioração da qualidade do ar nos centros urbanos.

Outro fator que consolida o GNV como uma alternativa atrativa é sua vantagem econômica. De acordo com Miracca e Hass (2021), o custo por quilômetro rodado com GNV é consideravelmente inferior ao dos combustíveis líquidos, o que o torna uma escolha eficiente, especialmente para frotistas, taxistas e operadores de transporte público.

O avanço de tecnologias voltadas ao aproveitamento do biogás e do biometano tem aberto novas possibilidades para o futuro do GNV, segundo análise de Zarzur (2005) por ser uma alternativa renovável ao gás natural de origem fóssil, pode tornar o uso do GNV ainda mais sustentável. Com a ampliação dos investimentos em pesquisa e infraestrutura, a expectativa é de que o GNV siga contribuindo de maneira relevante para a transição energética em escala global.

De forma geral, o GNV se consolida como uma opção viável e estratégica no cenário dos combustíveis, reunindo vantagens econômicas, segurança no abastecimento e benefícios ambientais. Seu crescimento contínuo evidencia o impacto positivo da busca por soluções energéticas mais eficientes, especialmente no setor de transportes. Com o suporte de políticas públicas e o avanço das tecnologias associadas, o GNV tende a se afirmar ainda mais como uma escolha racional para um futuro energeticamente mais sustentável.

3.2.1 Ciclo de Produção GNV

O percurso do Gás Natural Veicular até os veículos é longo e tecnicamente complexo, envolvendo diversas etapas desde a extração até o abastecimento final. Conforme aponta Costa (2016), o processo começa com a retirada do gás dos reservatórios subterrâneos e segue por uma cadeia que inclui a purificação do insumo, com a remoção de impurezas, e a compressão necessária para garantir seu transporte seguro e eficiente. Já segundo Freitag (2019), no contexto brasileiro, o suprimento de gás natural é abastecido tanto por fontes nacionais, como os campos do pré-sal, quanto por importações feitas através de extensos gasodutos que cortam o território nacional.

A Figura 51 ilustra de forma didática o ciclo de produção do GNV, desde sua origem até o consumo final, o processo começa com a exploração e exploração do gás em reservatórios subterrâneos, seguido pelo processamento, onde impurezas são removidas, e pelo beneficiamento, que separa frações pesadas e subprodutos. Em seguida, o gás é transportado por gasodutos até os centros de distribuição, onde é disponibilizado aos consumidores, como postos de abastecimento, cada etapa representada na imagem é fundamental para garantir a qualidade, segurança e eficiência do produto, conforme descrito pela DuPont (2025).

Figura 51 – Processo produtivo simplificado GNV



Fonte: DuPont. (2025)

Após ser extraído, o gás natural precisa passar por uma purificação rigorosa para eliminar elementos como enxofre e água. Segundo Paiva (2019), a eficiência da combustão do GNV está diretamente ligada à sua pureza, com o metano sendo o componente mais desejável. Freitag (2019) adiciona que, embora os gasodutos sejam a forma predominante de transporte do gás, algumas regiões dependem da distribuição por Gás Natural Comprimido (GNC) ou Gás Natural Liquefeito (GNL), o que amplia o alcance desse combustível.

O armazenamento do GNV nos postos exige infraestrutura específica, como cilindros de alta pressão que garantem segurança e eficiência no abastecimento. Marques (2018) aponta que esse fator torna o GNV um combustível diferenciado, pois

sua armazenagem deve seguir normas rigorosas para evitar riscos de vazamento. Freitag (2019) observa que, apesar das vantagens ambientais, o processo de produção e transporte do GNV pode liberar metano, um gás de efeito estufa potente, sendo essencial o desenvolvimento de estratégias para mitigar essas emissões.

A preocupação ambiental tem sido um dos fatores mais debatidos na expansão do GNV Costa (2016) ressalta que, embora sua combustão seja mais limpa do que a da gasolina e do diesel, os vazamentos na cadeia produtiva podem comprometer parte desses benefícios. Paiva (2019) reforça que, para maximizar as vantagens ecológicas desse combustível, é necessário um controle rigoroso de emissões em todas as fases de sua produção e distribuição.

No quesito eficiência energética, Paiva (2019) argumenta que, em motores automotivos, o GNV pode apresentar desempenho inferior ao diesel, especialmente em veículos pesados. No entanto, Freitag (2019) aponta que avanços tecnológicos têm reduzido essa diferença, permitindo o uso mais eficiente do GNV em diferentes aplicações, além disso, quando integrado a sistemas de trиграção o gás natural pode alcançar um rendimento energético superior ao de combustíveis líquidos, os altos custos de implementação dificultam a expansão da rede de abastecimento, tornando necessário um maior apoio governamental para viabilizar esse crescimento.

A infraestrutura ainda é um obstáculo significativo para a ampliação do uso do GNV no Brasil. Marques (2018) explica que a dependência de gasodutos e estações de compressão restringe sua popularização em algumas regiões. Diante desses desafios, diversos países têm implementado incentivos fiscais e políticas públicas para estimular o uso do GNV. Costa (2016) menciona que a Argentina e a Itália já possuem redes consolidadas de abastecimento, enquanto o Brasil ainda carece de maior infraestrutura.

De forma geral, o ciclo de produção do GNV impacta diretamente sua viabilidade como combustível alternativo. Paiva (2019) e Freitag (2019) concordam que, embora o GNV seja uma alternativa menos poluente que o diesel seu uso ainda depende de investimentos para controle de emissões e expansão da infraestrutura. Com o suporte adequado, esse combustível pode se consolidar como uma solução sustentável e economicamente viável.

3.2.2 Ciclo completo dos gases de efeito estufa em veículos pesados: da origem ao destino

O impacto ambiental causado pelas emissões de metano provenientes da cadeia de produção e transmissão de petróleo e gás é bem mais significativo do que se costumava imaginar, e a principal preocupação gira em torno de grandes vazamentos esporádicos que geralmente passam batido nos inventários oficiais de emissões.

Esses chamados "ultra-emissores" podem representar até 12% das emissões globais de metano associadas à produção de petróleo e gás, sendo que a maioria dos eventos ocorre durante manutenções ou falhas operacionais, o que indica que muitos desses vazamentos poderiam ser evitados com medidas de detecção e reparo relativamente simples e baratas, trazendo uma oportunidade concreta de reduzir as emissões sem grandes revoluções tecnológicas (Lauvaux et al., 2021)

Durante a fase de uso dos veículos pesados, ou seja, enquanto transportam cargas ou circulam nas estradas e cidades, a maior parcela das emissões de gases de efeito estufa ocorre principalmente nos modelos a diesel e gás natural, em que o consumo de combustíveis representa mais de 90 % das emissões do ciclo de vida do veículo e chega a superar até mesmo as emissões relacionadas à fabricação e desmontagem (Speirs et al., 2020)

Ao considerar o ciclo completo dos veículos pesados, é essencial avaliar não só a queima do combustível, mas também tudo o que vem antes disso. A etapa de extração, transporte e processamento do gás natural, por exemplo, é uma das principais responsáveis pelas emissões fugitivas de metano, gás com potencial de aquecimento global muito mais forte que o dióxido de carbono. Essas emissões ocorrem tanto de forma controlada quanto por falhas em equipamentos e muitas vezes são subestimadas nas análises convencionais, o que compromete a precisão dos inventários nacionais, como apontado por Speirs et al. (2020)

Mesmo nas regiões onde o gás natural é produzido com infraestrutura moderna, ainda há perdas relevantes em dutos, estações de compressão e conexões. McKain et al. (2016) destacam que essas perdas nem sempre são constantes e previsíveis, o que torna o seu monitoramento mais difícil. Para os veículos pesados que operam com GNV, esse problema pode ser ainda mais crítico, pois além do

impacto nas emissões, há também um desperdício energético significativo, os autores observaram que, da estação de bombeamento ao escapamento do caminhão, há múltiplas oportunidades para vazamentos ocorrerem, inclusive durante o reabastecimento e na queima incompleta no motor

A produção dos próprios veículos pesados também não é neutra em emissões, já que o processo de fabricação consome energia intensiva, principalmente nos setores de aço e alumínio, que compõem a estrutura da carroceria e dos componentes internos dos caminhões. Gan et al. (2023) mostram que quase um quarto das emissões de GEE de um veículo pode vir da sua fabricação, e isso se agrava em países cuja matriz energética ainda depende do carvão, tornando a pegada de carbono da construção veicular maior do que se imagina

Mesmo quando se opta por combustíveis alternativos como o GNV, os ganhos em emissões na etapa de uso nem sempre compensam a carga ambiental das etapas anteriores.

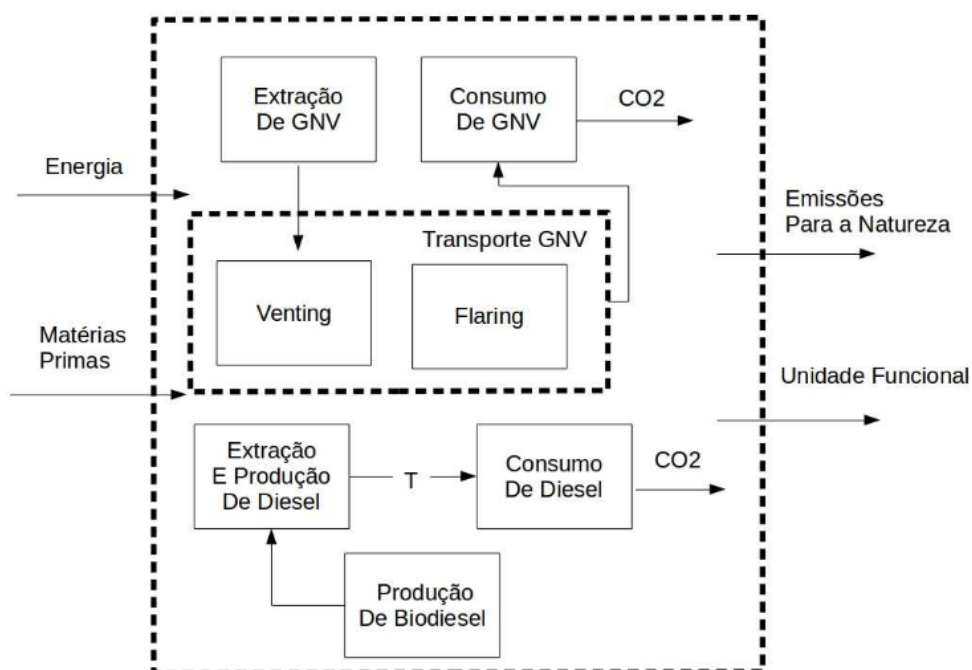
Costa (2016) observou em seu estudo que os caminhões movidos a GNV apresentam melhor desempenho em termos de emissão de CO₂ no uso urbano, mas quando se olha para o ciclo de vida total, que inclui o transporte do gás, a fabricação do veículo e sua operação, percebe-se que há aumento de poluentes como NOx e hidrocarbonetos não queimados, o que exige uma avaliação mais cuidadosa das vantagens ambientais do GNV.

Figura 52 apresenta, de forma esquemática, os principais fluxos de entrada e saída dos processos envolvidos na Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) dos combustíveis GNV e Diesel-B5 utilizados na coleta de resíduos. Representando os ciclos dos dois combustíveis desde a origem até o uso final, a imagem destaca etapas como extração, transporte, perdas por *venting* e *flaring* no caso do GNV, e a produção de biodiesel no ciclo do Diesel-B5. Ambos culminam na emissão de CO₂ durante o uso veicular, revelando os pontos críticos de impacto ambiental em cada cadeia. A figura permite visualizar, de modo claro, os elementos que compõem a unidade funcional do estudo e como os resíduos gasosos são direcionados ao meio ambiente.

Elaborada por Ronaldo Silvestre da Costa em sua tese de doutorado intitulada Quantificação das Emissões de Gases de Efeito Estufa para Veículos de Coleta de Resíduos Domiciliares Abastecidos com GNV e Diesel-B5 Utilizando Avaliação de

Ciclo de Vida, defendida na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul em 2016.

Figura 52 – Cadeia de Produção e utilização de GNV



Fonte: COSTA (2016)

Eventos de vazamento intenso, geralmente causados por falhas técnicas ou manutenção mal executada em dutos e compressores, representam uma ameaça importante para a estabilidade climática, já que essas liberações não aparecem nos relatórios convencionais e ocorrem de forma tão abrupta que comprometem todo o ganho ambiental de diversas frotas somadas (Lauvaux et al., 2021)

Depois de queimados no motor ou escapados como perdas, os gases de efeito estufa continuam ativos na atmosfera por muitos anos. O metano, por exemplo, permanece em média por uma década no ar, mas durante esse tempo pode gerar um impacto climático até 34 vezes maior que o CO₂ (Speirs et al., 2020)

McKain et al. (2016) apontam que os veículos pesados alimentados com gás natural ainda enfrentam sérios desafios quanto às emissões no uso final. Mesmo com motores modernos, a presença de metano não queimado no escapamento é inevitável, e por mais que essas emissões pareçam pequenas por quilômetro rodado,

ao longo de anos e milhares de veículos em operação, o volume acumulado se torna significativo e preocupante para o clima.

No fim da vida útil do veículo, o foco costuma ser o reaproveitamento de peças e a reciclagem do metal, mas as emissões continuam também nessa fase. O desmonte, o tratamento de resíduos industriais e a fundição de partes metálicas demandam energia e geram gases.

Além dos impactos diretos já mencionados, é importante considerar também os efeitos indiretos associados ao fim da vida útil dos veículos. A logística envolvida na movimentação de veículos descartados, bem como o consumo de insumos utilizados nos processos de separação e descarte de materiais perigosos, como fluidos automotivos e componentes eletrônicos, também contribuem para a pegada ambiental dessa etapa. Tais fatores, embora menos discutidos, reforçam a necessidade de estratégias integradas de gestão ambiental, que levem em conta não apenas a eficiência energética, mas também a sustentabilidade de toda a cadeia pós-consumo.

Isso demonstra que, ao contrário do GNV, as perdas e emissões indiretas são menos expressivas no ciclo do Diesel-B5, sendo o impacto mais concentrado no uso direto do combustível.

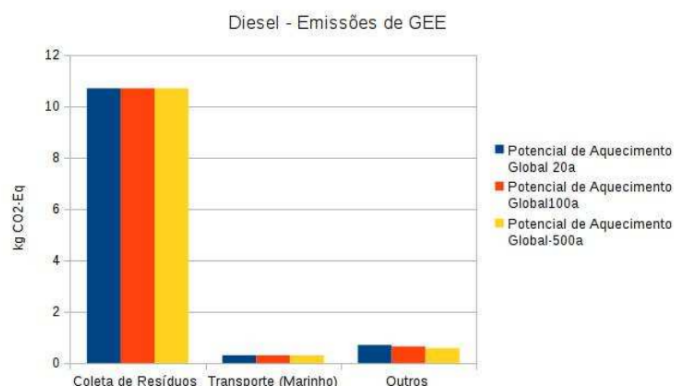
Outro aspecto importante envolve a reciclagem e o reaproveitamento dos materiais descartados, que podem ser aprimorados com processos mais eficientes e sustentáveis. A adoção de técnicas que reduzam o consumo energético na desmontagem e no tratamento de resíduos, assim como a reutilização de componentes eletrônicos, contribui para a redução da pegada ambiental geral do ciclo de vida dos veículos.

Além disso, políticas regulatórias e incentivos fiscais para a indústria podem acelerar a transição para tecnologias mais limpas, estimulando o desenvolvimento de combustíveis alternativos e motores com menor emissão. A integração entre fabricantes, governo e centros de pesquisa é essencial para estabelecer padrões e metas que promovam a sustentabilidade no setor de transporte pesado.

A Figura 53 evidenciada por COSTA (2016) ilustra as emissões de gases de efeito estufa para o ciclo de vida do Diesel-B5, também segmentadas por etapa e horizonte temporal. Percebe-se uma concentração praticamente exclusiva das

emissões na fase de coleta de resíduos, que atinge cerca de 10,5 kg CO₂ equivalente para todos os três horizontes temporais analisados.

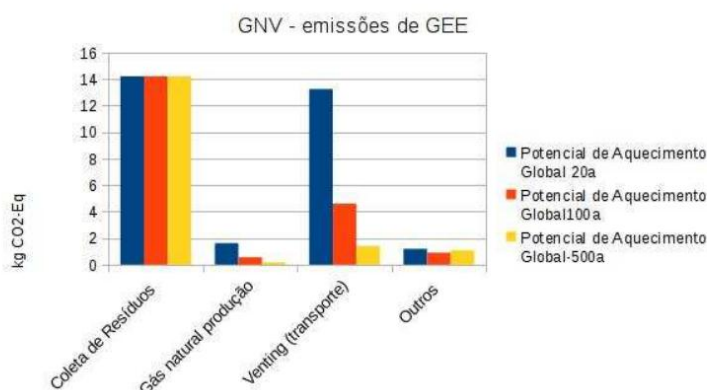
Figura 53 – Gráfico emissões GEE com o combustível Diesel



Fonte: COSTA (2016)

Já Figura 54 apresenta as emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso do Gás Natural Veicular, distribuídas conforme as etapas do ciclo de vida analisado. Observa-se que a fase de maior impacto é a de coleta de resíduos, com emissões próximas de 14 kg CO₂ equivalente, independentemente do horizonte temporal considerado (20, 100 ou 500 anos). A fase de produção do gás natural apresenta impacto modesto, enquanto a categoria “outros” revela contribuições residuais.

Figura 54 – Gráfico emissões GEE com o combustível GNV



Fonte: COSTA (2016)

O estudo de Costa (2016) mostra que, mesmo depois da fase de uso, há contribuições relevantes para o inventário de emissões, já que o consumo energético em processos industriais, o transporte do gás por longas distâncias e a existência de infraestrutura dedicada, como os postos de abastecimento de GNV, continuam gerando gases de efeito estufa mesmo após o fim da operação do caminhão.

Lauvaux et al. (2021) encerram esse panorama com um alerta importante. Mesmo com medidas de controle e tecnologias em desenvolvimento, ainda existe uma lacuna crítica entre o que se emite e o que se mede. Eles indicam que a persistência dessas emissões, somada à fragmentação entre políticas públicas e tecnologias emergentes, cria um ciclo constante de impacto e sugerem que o uso coordenado de sensores, satélites e ferramentas modernas pode ajudar a agir com mais eficiência, especialmente em regiões produtoras e nas rotas de transporte internacional.

3.2.3 Diferenças na disponibilidade entre GNV e diesel

Mesmo com todas as vantagens ambientais e econômicas do gás natural veicular, o acesso ao GNV ainda é muito mais restrito quando comparado ao diesel, que está disponível em praticamente qualquer ponto de abastecimento no Brasil e no mundo. Enquanto o diesel tem uma infraestrutura consolidada há décadas, o GNV ainda depende de investimentos em redes de distribuição, estações de compressão e incentivos públicos para expansão de sua malha de abastecimento. (GERUTU ET AL., 2023)

De acordo com Santos (2014), a estrutura para distribuição do GNV no Brasil é bastante limitada em comparação com o diesel, que conta com uma malha logística nacional robusta e eficiente, o autor ressalta que a maior parte do gás natural brasileiro está concentrada nas regiões Sudeste e Nordeste, e mesmo assim, muitas cidades ainda não têm acesso ao combustível, o que inviabiliza seu uso em larga escala. Isso compromete especialmente setores como o transporte de carga, que exige segurança de abastecimento em longas rotas.

A experiência internacional mostra um cenário semelhante, ainda que com variações regionais. Segundo Khan et al. (2015), o diesel continua a ser o combustível mais facilmente disponível em praticamente todas as regiões do mundo,

especialmente em corredores logísticos e centros urbanos. Já o GNV, mesmo em países que lideram sua adoção como Irã, Índia e Argentina, enfrenta desafios quanto à construção de estações e manutenção da regularidade de suprimento, o que torna sua adoção dependente de políticas públicas e estabilidade regulatória.

O estudo de Sacco e Frigo (2023) também aborda os desafios enfrentados no Brasil para expandir o uso do GNV, principalmente em razão da estrutura desigual de distribuição entre regiões, o Sudeste é a única região com presença mais consolidada de postos de GNV, enquanto no Norte e no Centro-Oeste a presença é quase nula. Mesmo com incentivos do governo e políticas de transição energética, a logística para ampliação da oferta do gás ainda é um gargalo evidente para a adoção do combustível em todo o território nacional.

Além disso, a diferença na disponibilidade afeta diretamente a confiança do consumidor no GNV. Quando o motorista ou a empresa não tem garantia de que conseguirá abastecer ao longo de uma rota, a tendência é optar por combustíveis mais amplamente distribuídos. Gerutu et al. (2023) observam que mesmo em Dar es Salaam, cidade com infraestrutura de gás natural mais desenvolvida da Tanzânia, o número de veículos convertidos a GNV representa uma fração muito pequena da frota total, justamente pela insegurança quanto à oferta do combustível.

Outro ponto que contribui para essa limitação de uso do GNV é o alto custo inicial para a criação da infraestrutura. Santos (2014) aponta que a implantação de um posto de abastecimento de GNV exige equipamentos mais caros, treinamento de pessoal e autorização ambiental específica. Diferentemente do diesel, que já é transportado por rodovias, oleodutos e ferrovias, o GNV depende de uma rede de gasodutos ou de transporte por caminhões especializados, o que encarece a operação e restringe a viabilidade em áreas de menor densidade populacional.

Por fim, mesmo com políticas que incentivam o uso de combustíveis mais limpos, como o GNV, a escolha final acaba recaindo sobre a disponibilidade e segurança do abastecimento, Sacco e Frigo (2023) afirmam que enquanto o diesel continua sendo uma opção onipresente e garantida no Brasil, o GNV ainda depende de um esforço de planejamento público, investimento privado e confiança do mercado para alcançar um patamar semelhante de confiabilidade e cobertura geográfica.

3.2.4 Estrutura de reabastecimento GNV

A expansão GNV no Brasil exige um planejamento estratégico e investimentos robustos, tornando-se um desafio para empresários e órgãos reguladores. Conforme Barbosa (2024) apesar de ser uma alternativa viável e mais sustentável em relação à gasolina e ao diesel, a infraestrutura de abastecimento ainda é limitada em diversas regiões, para ampliar o acesso ao GNV, é essencial expandir a rede de postos e aprimorar os métodos de distribuição do gás, tornando-o mais acessível e competitivo no mercado energético.

No que se refere à estrutura dos postos, o GNV demanda equipamentos específicos para compressão e armazenamento do gás antes do abastecimento dos veículos. O funcionamento do sistema pode ocorrer de duas formas principais: pelo uso do GNC ou pelo GNL. Os postos que operam com GNC recebem o gás diretamente da rede de distribuição e utilizam compressores para elevar a pressão para cerca de 200 bar. Já os postos que trabalham com GNL armazenam o gás em tanques criogênicos, garantindo uma maior densidade energética e permitindo maior autonomia para os veículos abastecidos.

Já de acordo com informações de Moraes (2013) a infraestrutura de um posto de GNV é complexa e exige um alto investimento inicial, diferente dos postos convencionais de combustíveis líquidos, os postos de GNV precisam contar com sistemas de compressão potentes, bancos de cilindros para armazenamento e *dispensers* de alta pressão para o abastecimento, além disso a segurança é um fator crítico, exigindo válvulas de alívio de pressão, sensores de vazamento e treinamento contínuo dos operadores para evitar incidentes. A adoção de sistemas em cascata, onde o gás é armazenado em diferentes níveis de pressão antes do abastecimento, tem se mostrado uma solução eficiente para reduzir o consumo de energia e aumentar a durabilidade dos equipamentos.

A distribuição do GNV ocorre principalmente de duas formas: por meio de gasodutos fixos ou dos chamados gasodutos virtuais, os gasodutos são a alternativa mais eficiente e econômica no longo prazo, mas sua implantação exige investimentos elevados em infraestrutura. Em regiões onde não há disponibilidade de dutos, a solução tem sido o transporte de gás por caminhões-tanque, tanto no formato

comprimido quanto no liquefeito, esse modelo adotado por estados como o Maranhão, onde a empresa GASMAR vem investindo na distribuição do GNV a partir da Bacia do Parnaíba, permite que o combustível chegue a locais mais distantes da malha dutoviária (Barbosa, 2024).

Destacado também por Praça (2003) enquanto a distribuição tradicional do GNV por gasodutos garante maior estabilidade no fornecimento, os desafios logísticos da infraestrutura exigem alternativas mais flexíveis. Para superar essa barreira, muitos postos estão adotando o conceito dos "gasodutos virtuais", que transportam o gás comprimido em carretas pressurizadas, esse método tem sido uma saída viável para garantir o abastecimento em áreas onde a instalação de gasodutos não é economicamente viável.

A Figura 55 ilustra de forma didática o processo logístico de fornecimento de GNC por meio da rede da Naturgy. O processo inicia-se no posto base, onde o gás natural é recebido da rede, passa por um medidor e é comprimido por um equipamento já existente no local, após a compressão o gás é armazenado em cilindros e utilizado para abastecer carretas especializadas. (Naturgy, 2025)

Figura 55 – Rede de Distribuição de GNV



Fonte: Naturgy (2025)

Diante do trabalho de Pereira (2021), a viabilidade econômica da operação dos postos de GNV também depende de estratégias para reduzir custos operacionais, um estudo propôs a ampliação da capacidade de armazenagem dos postos e a divisão dos cilindros em três seções de pressão distinta: baixa, média e alta. Essa abordagem

permite que o abastecimento ocorra de maneira mais eficiente, reduzindo a necessidade de uso constante do compressor.

Com isso, é possível economizar energia elétrica e diminuir o tempo de retorno sobre o investimento inicial, tornando a operação mais rentável a longo prazo, a análise financeira demonstrou que a implementação desse modelo permitiria que o posto recuperasse os investimentos em menos de dois anos um retorno altamente atrativo para empresários do setor.

Além da necessidade de investimentos financeiros, a regulamentação do setor é um aspecto fundamental para garantir a segurança e eficiência dos postos de GNV. As normas brasileiras estabelecem padrões rigorosos para a instalação e operação dos equipamentos, incluindo requisitos para a distância entre estruturas, manutenção periódica dos sistemas de abastecimento e controle ambiental. A fiscalização constante dessas instalações é essencial para evitar acidentes e garantir que os postos operem dentro dos padrões de segurança exigidos.

Conforme Michelena (2018) as perspectivas para a ampliação do GNV no Brasil são promissoras, especialmente com projetos como os "Corredores Azuis", que visam criar uma rede de postos interligados ao longo das principais rodovias do país. Essa estratégia busca facilitar o abastecimento para frotas comerciais e veículos de transporte de carga, setores que podem se beneficiar enormemente da economia proporcionada pelo uso do gás natural, a transição para um modelo energético mais limpo exige um planejamento estratégico e ações coordenadas entre o setor público e privado, mas o potencial do GNV como alternativa sustentável para o transporte brasileiro é inegável.

A Figura 56 apresenta o projeto "Corredores Azuis", uma iniciativa que busca estruturar rotas estratégicas de abastecimento com GNV no Brasil, o mapa destaca regiões do Norte e Nordeste do país com a presença de postos de GNV a cada 120 quilômetros, aproximadamente. Esses corredores têm como objetivo principal fomentar o uso de combustíveis mais limpos e econômicos, promovendo o GNV como alternativa viável para o transporte de cargas e passageiros em longas distâncias.

Encerrando o tópico com uma visão de Moraes (2013) a modernização da infraestrutura de GNV deve seguir uma abordagem integrada, unindo avanços tecnológicos, incentivos econômicos e políticas públicas bem estruturadas, com o avanço das descobertas de gás natural na camada do pré-sal e o crescente interesse por combustíveis menos poluentes o Brasil tem uma oportunidade única para expandir o uso do GNV e consolidá-lo como uma peça-chave na transição para uma matriz energética mais sustentável.

3.2.5 Primeiros caminhões GNV

Os primeiros veículos movidos a GNV de acordo com Zarzur (2005) surgiram como uma resposta à necessidade de combustíveis alternativos, que fossem mais econômicos e menos poluentes. No início o GNV era visto com certa desconfiança, pois a tecnologia ainda estava em fase de desenvolvimento e poucos postos de abastecimento estavam disponíveis.

No entanto, ao longo do tempo, os benefícios do GNV começaram a superar os desafios, tornando-se uma solução viável tanto para os consumidores quanto para o meio ambiente. Seu uso começou a se expandir principalmente nos grandes centros urbanos, onde a busca por alternativas mais sustentáveis e econômicas se tornou essencial.

Veiga (2010) acrescenta que a história do GNV está diretamente ligada ao desenvolvimento da indústria do gás natural. Desde os primeiros registros da utilização do gás natural na China e no Irã, passando pela Revolução Industrial, até chegar ao século XX, quando começaram a surgir iniciativas de aplicação em veículos, houve um longo caminho de descobertas e aperfeiçoamentos.

Os primeiros testes com o uso do gás natural em automóveis ocorreram na década de 1930, principalmente na Europa. Durante a Segunda Guerra Mundial, devido à escassez de combustíveis líquidos, diversos países passaram a explorar o uso do gás natural como alternativa. No entanto, foi a crise do petróleo dos anos 1970 que impulsionou sua adoção em larga escala, pois governos e indústrias buscaram reduzir sua dependência dos combustíveis fósseis tradicionais.

No Brasil, a introdução do GNV nos transportes começou por volta da década de 1980, com os primeiros incentivos governamentais e investimentos na infraestrutura de distribuição, a cidade do Rio de Janeiro foi pioneira nesse processo, com a conversão de frotas de táxis e veículos de transporte público. O governo, percebendo os benefícios econômicos e ambientais do combustível, começou a fomentar seu uso por meio de isenções fiscais e incentivos para conversão de veículos. Ainda assim, a expansão foi gradual, pois a falta de infraestrutura e os custos iniciais da conversão eram entraves para muitos motoristas, com o passar dos anos políticas públicas e investimentos em postos de abastecimento aceleraram a disseminação do GNV. (Zarzur, 2005)

O funcionamento de um veículo movido a GNV é baseado na substituição parcial ou total do combustível original pelo gás natural, armazenado em cilindros de alta pressão. Essa conversão pode ser realizada em motores do ciclo Otto e Diesel, sendo que, no caso do ciclo Otto, o veículo pode operar de forma bicombustível, alternando entre gasolina, etanol e gás natural. A conversão trouxe algumas limitações iniciais, como perda de potência e a necessidade de espaço extra para os cilindros, mas as vantagens econômicas compensaram essas questões, além disso, com os avanços tecnológicos, os sistemas de conversão passaram a ser mais eficientes, reduzindo significativamente as perdas de desempenho e proporcionando maior autonomia aos veículos movidos a gás. (Veiga, 2010)

3.2.6 Funcionamento Geral tecnologia GNV

O GNV é uma alternativa cada vez mais popular, não apenas por ser uma fonte energética mais limpa, mas também por ser mais econômico para as frotas comerciais e usuários individuais. Conforme os conhecimentos de Ayyappan (2024) este combustível é armazenado em cilindros de alta pressão e, ao ser utilizado no motor, passa por um processo de redução de pressão e injeção que permite sua combustão eficiente. O objetivo deste estudo é detalhar como funcionam os veículos a GNV, analisando os principais componentes envolvidos, a adaptação necessária dos veículos, o processo de combustão, e os impactos econômicos e ambientais dessa tecnologia.

É visto também no manual GNV da Scania de 2023 a utilização dessa tecnologia no setor automotivo está diretamente relacionada a uma série de vantagens, como a diminuição das emissões de poluentes, custos mais baixos de combustível e menor necessidade de manutenção do motor, em comparação com os veículos movidos por combustíveis fósseis.

Este trabalho abordará de forma detalhada os componentes e o funcionamento de um veículo a GNV, incluindo as modificações necessárias no chassi e os sistemas de controle eletrônico que garantem a eficiência da combustão. A análise incluirá ainda uma discussão sobre a segurança do sistema, a performance dos motores a GNV e os aspectos econômicos e ambientais dessa tecnologia.

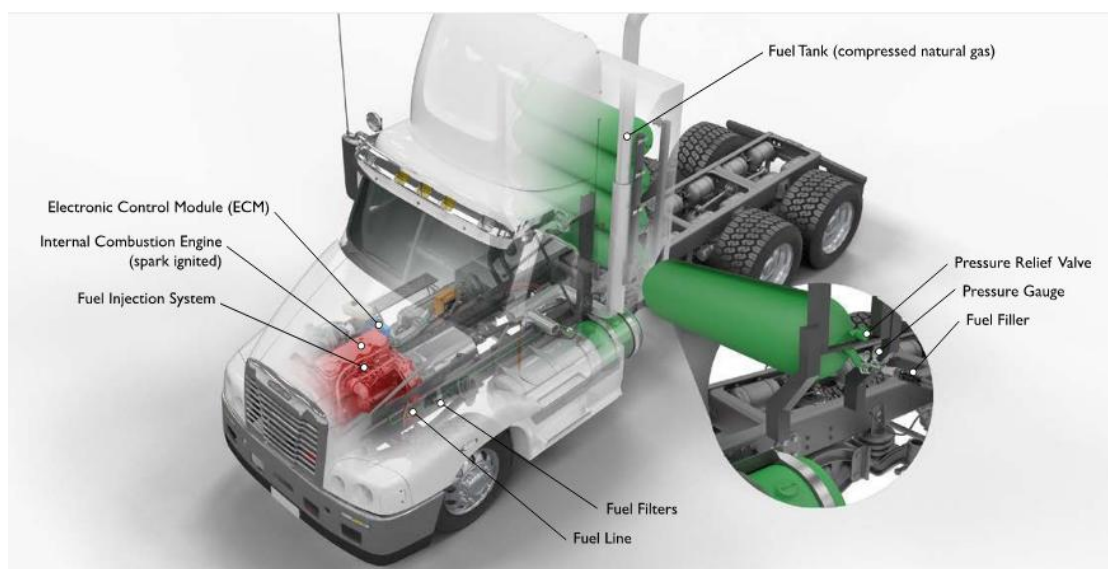
Os veículos a GNV funcionam de maneira similar aos veículos a gasolina ou diesel, mas com um combustível diferente, o Gás Natural. O GNV é composto principalmente por Metano (CH_4), que possui uma maior octanagem do que a gasolina, o que permite uma combustão mais eficiente e controlada, o combustível é armazenado em cilindros de alta pressão, que precisam ser projetados para suportar pressões de até 200 bar, garantindo a segurança no transporte e utilização do gás. (Scania, 2023)

O funcionamento básico de um veículo a GNV envolve a liberação do gás armazenado nos cilindros, a redução de sua pressão, e a injeção do gás no motor, onde ocorre a combustão. No processo de combustão o gás se mistura com o ar, e a ignição é gerada pela vela de ignição. Esse processo ocorre dentro dos cilindros do motor, similar ao que acontece nos veículos a gasolina. A principal diferença é que a queima do GNV ocorre de forma mais controlada, resultando em uma combustão mais limpa e uma redução nas emissões de poluentes. (Ayyappan, 2024)

Neste tema podemos nos referenciar também no trabalho de Semin (2008), o sistema de GNV de um veículo é composto por diversos componentes críticos, cada um com uma função específica para garantir o funcionamento seguro e eficiente do veículo.

Os principais componentes do sistema são os cilindros de armazenamento, o regulador de pressão, o sistema de injeção e os sensores de controle eletrônico, na Figura 58 temos os sistemas vitais para o funcionamento da tecnologia GNV em destaque.

Figura 58 – Esquema GNV e seus sistemas em foco



Fonte: U.S. DOE (2025)

3.2.6.1 Conjuntos de armazenamento e alimentação

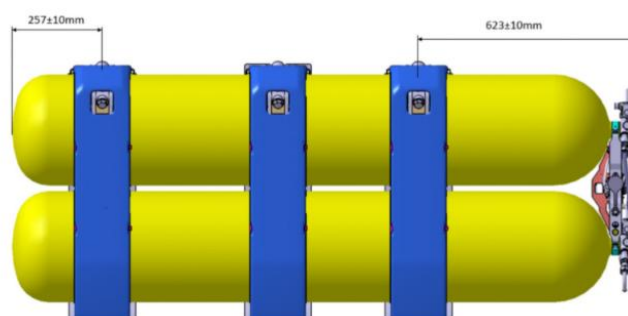
O sistema de alimentação de GNV de um veículo é composto por diversos componentes técnicos, sendo o mais importante o cilindro de armazenamento. O gás natural é armazenado a pressões de até 200 bar, dentro de cilindros de alta resistência feitos geralmente de aço carbono ou fibra de carbono. Esses cilindros são protegidos por válvulas de segurança que controlam a pressão interna e evitam falhas no sistema. O gás armazenado é posteriormente liberado para o motor por meio de um sistema de reguladores de pressão, que garantem que a pressão do GNV esteja sempre adequada para a queima eficiente no motor. A eficiência do motor depende diretamente da qualidade do sistema de alimentação, que precisa ser preciso no controle de vazão e pressão. (Semin, 2008)

Além disso, o sistema de alimentação de GNV incorpora válvulas de segurança e dispositivos de bloqueio que são ativados em caso de falhas nos componentes. Estas válvulas garantem que o fluxo de gás seja interrompido automaticamente, evitando vazamentos perigosos em situações extremas, como colisões ou falhas no sistema. Este controle é essencial para garantir a segurança tanto dos ocupantes do veículo quanto de outras pessoas no entorno. O processo de distribuição do gás também é monitorado por sensores que indicam a pressão e o volume de gás, oferecendo dados em tempo real ao motorista. (Scania, 2023).

Semin (2008) comenta que os cilindros de armazenamento de GNV são os principais responsáveis pelo fornecimento de combustível para o motor. Fabricados com materiais de alta resistência, como aço carbono, alumínio e compósitos de fibra de carbono, esses cilindros são projetados para suportar pressões extremamente altas, de até 200 bar. Eles possuem múltiplas camadas de proteção e são submetidos a rigorosos testes de resistência, incluindo testes de impacto, fadiga mecânica e exposição a altas temperaturas.

Na Figura 59 temos um exemplo didático de um cilindro revestido preparado para o armazenamento do GNV sob alta pressão.

Figura 59 – Cilindros de armazenamento GNV



Fonte: Scania (2023)

De acordo com Pelliza (2003) esses cilindros são instalados no veículo de forma estratégica para garantir a segurança e a distribuição adequada do peso, em veículos leves geralmente os cilindros são instalados no porta-malas, enquanto em ônibus e caminhões os cilindros podem ser montados no teto ou sob o chassi, de modo a minimizar o impacto sobre a dirigibilidade e a estabilidade do veículo.

O gás natural armazenado nos cilindros é mantido a uma pressão muito alta, o que não é adequado para a alimentação do motor, então o sistema de GNV inclui um redutor de pressão, que reduz a pressão do gás a níveis adequados para o sistema de injeção do motor. O redutor de pressão geralmente opera em dois estágios: o primeiro estágio reduz a pressão de 200 bar para cerca de 10-15 bar, enquanto o segundo estágio ajusta a pressão para valores entre 2 e 10 bar, dependendo do tipo de sistema de injeção utilizado. (Semin, 2008)

Considerando também com a pesquisa do departamento de energia dos Estados Unidos de 2008, além do redutor de pressão, o sistema de GNV inclui sensores de pressão que monitoram as variações na pressão do gás. Caso a pressão ultrapasse os limites estabelecidos, a unidade de controle eletrônico do veículo pode intervir, ajustando o fluxo de combustível ou interrompendo o fornecimento de gás em caso de falha.

3.2.6.2 Sistema de Injeção e Combustão do GNV

O sistema de injeção de GNV é responsável por garantir que o combustível seja entregue ao motor de forma eficiente e adequada, possibilitando uma combustão otimizada. A injeção do GNV no motor pode ocorrer de duas formas principais: injeção no coletor de admissão ou injeção direta. Cada uma dessas formas de injeção apresenta vantagens e desvantagens dependendo do tipo de motor e da aplicação do veículo. (Semin, 2008).

Neste sistema, o GNV é misturado com o ar antes de entrar na câmara de combustão. O gás é conduzido até o coletor de admissão, onde é misturado com o ar, e a mistura é então aspirada para os cilindros. O misturador mecânico ou os bicos injetores controlam a quantidade exata de gás que é introduzida no motor. Este sistema é amplamente utilizado em veículos que passaram por conversões de motores convencionais para o uso de GNV. Embora seja uma solução mais simples e de custo mais baixo, a injeção no coletor de admissão pode apresentar perdas de eficiência, pois a mistura de gás e ar não é sempre homogênea entre os cilindros. (U. S. DOE, 2015).

Conforme Semin (2008), a injeção direta de GNV, por outro lado, permite que o gás seja injetado diretamente na câmara de combustão sob alta pressão, esse tipo

de injeção é mais preciso, pois o controle do fluxo de gás e ar ocorre diretamente dentro da câmara de combustão. Como resultado, a eficiência da queima do gás é muito maior, o que leva a um melhor desempenho e menor consumo de combustível. Esse sistema é mais comum em veículos mais modernos e de maior desempenho, que utilizam sistemas de injeção eletrônica de última geração.

Pelliza (2003) comenta também que a mistura de ar e GNV é essencial para garantir que a combustão ocorra de maneira eficiente e com baixos níveis de emissões. O controle dessa mistura é feito por sistemas de injeção eletrônica, que ajustam a quantidade de ar e combustível em tempo real com base nas condições de operação do motor. Sensores de oxigênio localizados no escapamento monitoram a qualidade da combustão e ajustam continuamente o sistema de injeção para otimizar o desempenho e minimizar as emissões. O sistema eletrônico também ajusta o tempo de ignição e a proporção ar-combustível para se adaptar a diferentes regimes de operação.

A Figura 60 apresenta o sistema de distribuição de GNV de um caminhão Scania G460. À direita, encontra-se o conjunto responsável pela regulação e controle da pressão do gás, incluindo componentes como válvulas, filtros e redutores de pressão.

O gás segue pela linha azul, identificada como linha de baixa pressão, até os injetores instalados no *Rail* (barra de distribuição), localizado à esquerda da imagem. Também está presente a linha verde, que representa o circuito de alta pressão do sistema.

O diagrama evidencia como os diferentes segmentos do circuito de gás se organizam no veículo. Componentes estratégicos são distribuídos ao longo da estrutura para garantir o controle eficiente do combustível em cada etapa do processo. A disposição visual das cores facilita a identificação das distintas funções operacionais, permitindo compreender o trajeto do gás desde seu armazenamento até sua entrega ao motor.

A direção do fluxo de gás acompanha o “sentido de marcha” indicado por uma seta para a esquerda, demonstrando como o GNV é conduzido desde o sistema de controle até os injetores que alimentam o motor.

Figura 60 – Sistema de distribuição GNV



Fonte: Scania (2023)

A eficiência na mistura e na ignição tem um impacto significativo na performance térmica do motor, além de evitar problemas como a pré-detonção, que pode danificar os componentes internos do motor. Esse processo de controle eletrônico da combustão, ao otimizar a relação ar-combustível, também reduz as emissões de gases poluentes, como óxidos de nitrogênio e monóxido de carbono, contribuindo para a sustentabilidade ambiental dos veículos a GNV. (U.S. DOE, 2015)

Os veículos movidos a GNV utilizam sistemas de injeção eletrônica para otimizar a queima do combustível no motor, o sistema de injeção de GNV funciona de forma semelhante ao sistema de injeção eletrônica de veículos movidos a gasolina, mas com adaptações específicas para o GNV, o módulo de controle eletrônico recebe informações de vários sensores localizados no motor, como o sensor de temperatura e o sensor de pressão do gás, e ajusta a quantidade de GNV injetado em cada cilindro para garantir uma combustão eficiente. A quantidade exata de combustível é ajustada em tempo real para otimizar o desempenho do motor e minimizar as emissões de poluentes. (U.S DOE, 2015)

Uma das principais vantagens do sistema de injeção eletrônica de GNV é sua capacidade de melhorar a eficiência do combustível e reduzir as emissões de gases poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx) e partículas. Isso ocorre porque o sistema de injeção ajusta automaticamente a proporção de ar-combustível, proporcionando uma combustão mais completa e eficiente. Além disso, o uso de sistemas de controle de emissões contribui para atender às normas ambientais, reduzindo significativamente os impactos negativos do transporte sobre a saúde pública. (Semin, 2008).

A Figura 61 mostra a visão geral do sistema de injeção eletrônica de GNV utilizado em veículos pesados, como o Scania G460. O sistema é composto por uma linha de GNV, representada em verde, e uma linha do sistema de arrefecimento, em azul. O gás é armazenado em cilindros que possuem válvulas solenoides individuais (itens 1 a 8), distribuídas entre os lados esquerdo e direito do veículo. O abastecimento ocorre pelo bico (item 9), passando pela válvula de fechamento manual (10), manômetro (11) e regulador/redutor de pressão (12), que ajusta a pressão do gás antes de sua utilização. Sensores de pressão (13 e 17) monitoram o sistema, enquanto a válvula solenoide de baixa pressão (14) controla o fluxo de gás para o motor.

O funcionamento eficiente do sistema depende da integração precisa entre os componentes eletrônicos e mecânicos, garantindo segurança e desempenho durante a operação. A central eletrônica do motor recebe os sinais dos sensores distribuídos ao longo do sistema e ajusta, em tempo real, a quantidade de gás injetado conforme a demanda de torque e rotação. Além disso, o sistema de arrefecimento desempenha um papel crucial na manutenção da temperatura adequada do redutor de pressão e de outros componentes sensíveis, evitando falhas causadas por superaquecimento. Essa configuração é especialmente importante em veículos pesados, que operam sob altas cargas e exigem um fornecimento de combustível estável e contínuo.

O gás segue então pelo filtro de combustível (15) até os injetores (16), responsáveis por realizar a injeção nos cilindros do motor, conforme a demanda, com todo o processo sendo gerenciado eletronicamente para garantir eficiência, segurança e controle preciso da mistura ar-combustível.

Figura 61 – Sistema de Injeção eletrônica GNV

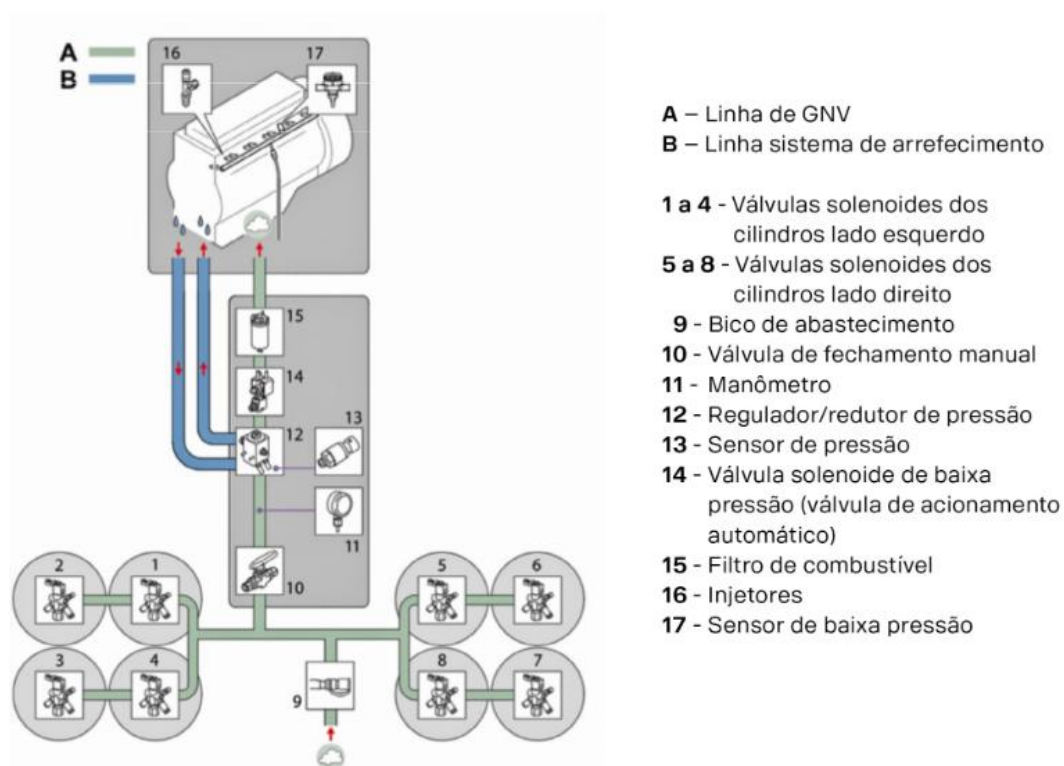


Figura 1: Visão geral do sistema GNV

Fonte: Scania (2023)

Destacado pela U.S. DOE (2015) os motores movidos por GNV exigem um sistema de ignição especializado para lidar com as características do gás natural, esse combustível possui uma temperatura de ignição mais alta do que os combustíveis líquidos, como gasolina ou diesel, o que requer ajustes na ignição para garantir uma combustão eficiente. Para isso, são utilizadas velas de ignição de grau térmico mais alto e bobinas de ignição mais potentes, capazes de gerar faíscas com a intensidade necessária para a ignição do gás natural.

No contexto da ignição, o controle eletrônico não apenas ajusta a ignição, mas também realiza diagnósticos constantes para identificar falhas em componentes como velas e bobinas de ignição. Caso uma falha seja detectada, o sistema pode desativar o fornecimento de gás ou ativar modos de segurança, prevenindo danos ao motor e garantindo a segurança do veículo. (PELLIZA, 2003).

3.2.6.3 Sistemas Complementares

O sistema de arrefecimento dos veículos a GNV é um componente técnico crucial, pois ele mantém a temperatura do motor dentro dos parâmetros ideais para funcionamento. O GNV tem um poder calorífico menor em comparação com a gasolina e o diesel, o que pode levar a uma maior quantidade de calor gerado durante a combustão. Para evitar o superaquecimento e danos ao motor, o sistema de arrefecimento deve ser eficiente na dissipação do calor gerado. O sistema de arrefecimento é geralmente composto por radiadores e bombas de circulação de fluido, que ajudam a regular a temperatura do motor e do sistema de combustão. (Ayyappan, 2024).

Segundo material da Scania (2023) em veículos a GNV, o sistema de arrefecimento é interligado ao sistema de injeção para garantir que a temperatura do motor se mantenha em níveis ideais durante o funcionamento. Quando o motor atinge uma temperatura alta, o sistema de arrefecimento entra em ação, garantindo que o motor não sofra danos térmicos. Além disso, o sistema de arrefecimento precisa ser monitorado constantemente para evitar falhas, como o ressecamento de mangueiras ou falhas na bomba de água, que podem causar falhas catastróficas no motor e no sistema de GNV.

Uma das vantagens técnicas mais destacadas dos veículos movidos a GNV é a redução nas emissões de poluentes, em comparação com os veículos movidos a gasolina e diesel. O GNV emite substancialmente menos CO, NOx e material particulado, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas, a utilização de GNV como combustível é uma das alternativas mais eficazes para cumprir as normas de emissão em muitas cidades, que têm adotado limites

rigorosos para reduzir os poluentes provenientes do setor de transporte. (U.S. DOE, 2015).

O motor de um veículo a GNV é projetado para operar com uma taxa de compressão mais alta, o que favorece uma queima mais completa e reduz a emissão de gases poluentes. Isso é possível graças à maior eficiência da combustão do GNV em comparação com os combustíveis líquidos. O sistema de controle de emissões é ajustado para garantir que os gases de escape sejam filtrados adequadamente antes de serem liberados na atmosfera, utilizando catalisadores e filtros de partículas específicos para veículos a GNV. Este sistema técnico é vital para a aderência às regulamentações ambientais mais recentes. (Semin, 2008).

Ayyappan (2024) adiciona ao tema que o processo de reabastecimento de veículos a GNV também possui características técnicas que garantem a segurança e a eficiência do processo. O GNV é reabastecido através de postos de abastecimento especializados, que utilizam compressores de alta pressão para comprimir o gás natural e transferi-lo para os cilindros do veículo, o compressor garante que o gás seja armazenado de forma segura, mantendo a pressão interna adequada para a operação do motor. O tempo de reabastecimento é semelhante ao de um veículo a gasolina ou diesel, variando de 3 a 5 minutos, dependendo da capacidade do cilindro do veículo e da pressão do posto de abastecimento.

O processo de reabastecimento também envolve sensores de segurança, que monitoram a pressão durante o reabastecimento para garantir que o processo ocorra de maneira segura e sem vazamentos, caso detectem alguma irregularidade, como uma diferença de pressão inadequada, os sensores acionam alarmes e interrompem o abastecimento, evitando riscos de acidentes. A tecnologia de reabastecimento tem evoluído para incluir sistemas de monitoração inteligente, que permitem realizar a gestão eficiente da distribuição do GNV, otimizando o processo de abastecimento em áreas com alta demanda e mantendo a segurança do sistema. (Scania, 2023)

3.2.7 Particularidades do uso em caminhões

De acordo com Pereira et al. (2021) a implementação do GNV em veículos pesados exige uma análise aprofundada dos aspectos técnicos envolvidos diferente

dos veículos leves, que já utilizam amplamente essa tecnologia, a adaptação em caminhões e ônibus impõe desafios complexos relacionados à modificação dos motores, armazenamento seguro do combustível, infraestrutura de abastecimento e normas de segurança.

Modificação dos Motores para GNV

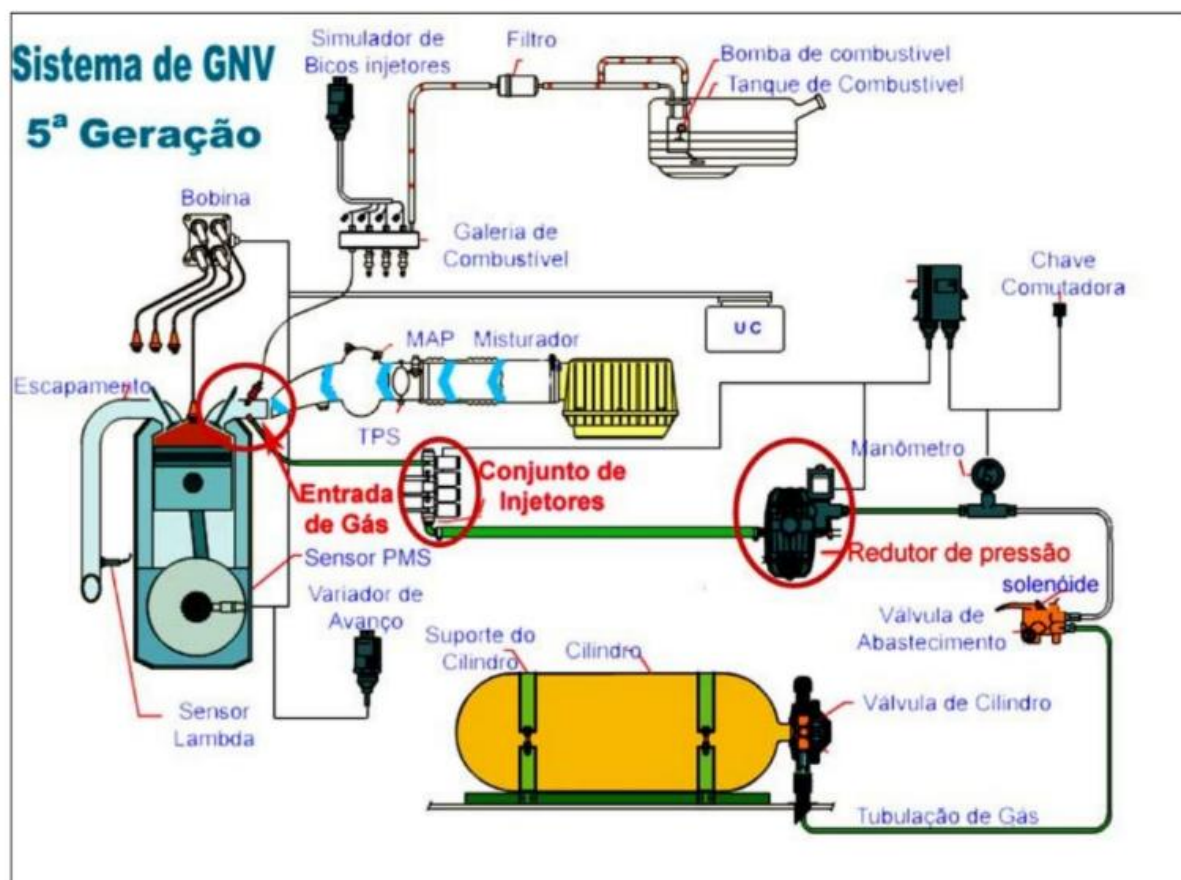
Os motores dos veículos pesados operam tradicionalmente no ciclo Diesel, o que exige adaptações significativas para o uso do GNV. Existem duas abordagens principais: a conversão total para um motor de ignição por centelha, que exige alterações na taxa de compressão e inclusão de velas de ignição, e o sistema dual-fuel, que mantém a injeção de diesel, mas complementa a combustão com gás natural (Moroni, 2020).

A conversão total requer um redesenho do cabeçote do motor para acomodar velas de ignição, ajuste na taxa de compressão para otimizar a combustão do gás e um novo sistema de gerenciamento eletrônico, a taxa de compressão reduzida evita detonação precoce, garantindo uma queima mais eficiente e controlada. No sistema dual-fuel, a introdução do gás ocorre na admissão, e a combustão é iniciada pelo diesel, esse método permite manter parte do desempenho original do motor a diesel, além de reduzir emissões de poluentes. No entanto, a proporção de substituição do diesel pelo GNV depende das condições operacionais e da carga do motor, para que essa conversão seja eficiente, é necessário um sistema de controle eletrônico que ajuste automaticamente a quantidade de gás injetado, maximizando a economia de combustível sem comprometer o desempenho (U.S. DOE, 2019).

A Figura 62, conforme Veiga (2010), apresenta o sistema de GNV de 5ª geração, destacando sua estrutura integrada ao motor de combustão interna. O gás armazenado em cilindros passa por uma válvula de abastecimento, válvula de cilindro, solenoide, redutor de pressão e manômetro, sendo conduzido por tubulação até o conjunto de injetores, que alimenta o motor. O sistema conta com sensores como *Manifold Absolute Pressure* (MAP), *Throttle Position Sensor* (TPS) e sensor lambda, além de um misturador, variador de avanço e sensor Ponto morto superior (PMS), que ajustam a operação para garantir eficiência e segurança.

Uma chave comutadora permite alternar entre GNV e combustível líquido, enquanto a unidade de controle gerencia eletronicamente todo o processo, otimizando o desempenho e reduzindo emissões.

Figura 62 – Exemplo conversão para sistema Bicombustível



Fonte: Veiga (2010)

Sistemas de Armazenamento e Segurança

O armazenamento do GNV exige cilindros de alta pressão que operam geralmente entre 200 e 250 bar, esses cilindros são projetados com materiais de alta resistência, como compósitos de fibra de carbono ou ligas metálicas reforçadas, para garantir segurança contra impactos e variações térmicas (PEREIRA ET AL., 2021).

Com o bem citado por Moroni (2020) além da resistência estrutural dos cilindros, o sistema de armazenamento é equipado com múltiplos dispositivos de segurança, incluindo válvulas de alívio de pressão, sensores de vazamento e sistemas de desligamento automático em caso de falhas. Isso é essencial porque o GNV, sendo

um gás de alta volatilidade, pode se dissipar rapidamente no ar, reduzindo o risco de explosões, mas aumentando a necessidade de monitoramento contínuo. Testes rigorosos, incluindo simulações de impacto e variações térmicas, são aplicados para garantir a resistência estrutural desses cilindros em condições adversas, além disso, a disposição dos cilindros no chassi do veículo deve ser cuidadosamente planejada para otimizar a distribuição de peso e evitar interferências com outros componentes do caminhão.

Sistemas de Injeção e Combustão

A injeção do GNV no motor pode ser realizada de diferentes formas, dependendo da configuração adotada. Nos motores convertidos para ignição por centelha, o gás é misturado ao ar antes da compressão, semelhante ao ciclo Otto. Já nos sistemas dual-fuel, o GNV é injetado no coletor de admissão ou diretamente na câmara de combustão, onde se mistura com o diesel pulverizado (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2019).

O gerenciamento eletrônico do motor é essencial para otimizar a relação entre os dois combustíveis. Sensores monitoram a composição da mistura ar-combustível e ajustam a dosagem do GNV em tempo real para garantir uma queima eficiente e evitar perdas de potência, o avanço da ignição e a calibração do sistema de injeção devem ser ajustados para compensar as diferenças no poder calorífico entre o GNV e o diesel, garantindo uma combustão completa e evitando detonações indesejadas. Um fator crítico é o tempo de injeção do gás, que precisa ser sincronizado com a fase de admissão para evitar desperdícios e melhorar a eficiência térmica do motor (PEREIRA ET AL., 2021).

Eficiência Energética e Emissões

O GNV apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética e redução de emissões. Comparado ao diesel, o gás natural possui uma queima mais limpa, com menor emissão de NOx e praticamente nenhuma emissão de material particulado (MORONI, 2020).

No artigo da U.S A combustão do GNV reduz a liberação de CO₂ em até 20%, tornando-se uma alternativa atrativa para transportadoras que buscam reduzir seu impacto ambiental. Entretanto, sua eficiência térmica pode ser inferior à do diesel, o que impacta no consumo de combustível. Para mitigar essa diferença, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas, incluindo sistemas de recuperação de calor residual e otimização da injeção para aumentar a eficiência global do motor. Outro fator relevante é o menor torque em baixas rotações dos motores a GNV, o que exige ajustes nos sistemas de transmissão para garantir uma operação eficiente em terrenos acidentados (U.S. DOE, 2019).

Infraestrutura de Abastecimento

Observado por Pereira et al. (2021) a disponibilidade de postos de abastecimento de GNV ainda é um fator limitante para sua adoção em larga escala. Enquanto o diesel pode ser encontrado em praticamente qualquer ponto de rodovia, o GNV depende de uma infraestrutura específica, composta por estações de compressão e distribuição do gás.

Para contornar essa limitação, diversas iniciativas estão sendo implementadas, como os chamados "corredores azuis", que preveem a instalação de postos estratégicos ao longo das principais rotas de transporte de carga. O desenvolvimento de estações de abastecimento móvel e tecnologias de armazenamento de GNL estão sendo estudados para aumentar a autonomia dos veículos e reduzir os intervalos entre os reabastecimentos, a integração do GNV com redes de distribuição de biometano também pode ampliar a disponibilidade desse combustível, promovendo ainda mais sustentabilidade na matriz energética dos transportes pesados (MORONI, 2020).

Regulamentação e Certificação Técnica

Para garantir a segurança e eficiência do uso do GNV em veículos pesados, é essencial atender às normas estabelecidas por órgãos reguladores, como o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) e a ANP (U.S. DOE, 2019).

A certificação dos cilindros de armazenamento deve ser realizada periodicamente, e os sistemas de injeção precisam passar por testes rigorosos para garantir conformidade com os padrões de emissões e segurança operacional. Além disso, inspeções frequentes são obrigatórias para assegurar a integridade estrutural dos cilindros e evitar riscos operacionais. Outro ponto essencial na regulamentação é a padronização da pressão de abastecimento e dos tipos de conectores utilizados, garantindo compatibilidade entre diferentes fornecedores e veículos, o cumprimento dessas regulamentações não só assegura a segurança da frota, mas também facilita a adoção dessa tecnologia por empresas do setor de transporte (Pereira et al., 2021).

3.2.8 Aplicações GNV na atualidade

A utilização do GNV em veículos pesados tem se consolidado como uma alternativa viável e estratégica frente aos desafios contemporâneos de sustentabilidade, eficiência energética e redução de custos operacionais no setor de transporte rodoviário de cargas. Com a crescente preocupação global em torno da emissão de gases poluentes e a busca por soluções que contribuam para a transição energética, fabricantes de veículos comerciais têm direcionado esforços no desenvolvimento de tecnologias que conciliem desempenho robusto com menor impacto ambiental.

Nesse contexto, os caminhões movidos a GNV surgem como uma solução promissora, especialmente em aplicações de longa distância e alto volume de carga. Dentre os modelos que se destacam no mercado, o Scania G460 e o Iveco Stralis NP representam avanços significativos na consolidação dessa tecnologia.

Ambos os modelos ilustram como o GNV pode ser integrado de forma eficaz a frotas de transporte pesado sem comprometer a produtividade, sendo ainda uma resposta concreta às exigências regulatórias ambientais cada vez mais rígidas. Dessa forma, o uso do GNV em veículos pesados deixa de ser uma tendência e passa a ser uma realidade concreta no avanço rumo a um transporte mais limpo, econômico e sustentável.

3.2.8.1 Scania GNV G 460

Com base em uma documentação técnica disponibilizada nos próprios sites Scania visto nas referências de 1a a 1c, elaboramos este tópico destacando alguns dos pontos fortes e funcionamento por trás da tecnologia embarcada neste modelo.

A Scania tem investido no desenvolvimento de soluções inovadoras para o transporte rodoviário de cargas, e o modelo G 460 movido a GNV ilustrado na Figura 63, representa um avanço significativo nesse contexto. Projetado para operar exclusivamente com GNC e GNL, esse caminhão alia eficiência energética, desempenho robusto e compromisso ambiental sendo uma alternativa viável ao diesel.

Figura 63 – Scania G60 GNV



G460 A6X2 NA (GÁS – CNG)

Fonte: Scania (2024)

A decisão da Scania em utilizar o gás natural como fonte primária de energia está baseada na necessidade de reduzir as emissões de poluentes e os custos operacionais, sem comprometer potência e confiabilidade. O G 460 incorpora um sistema de combustão otimizado, soluções avançadas para armazenamento e

distribuição do gás, além de um gerenciamento eletrônico sofisticado que ajusta a queima do combustível em tempo real.

O motor do Scania G 460 opera sob o ciclo Otto, diferindo dos motores a diesel por utilizar velas de ignição para promover a combustão do gás. Esse tipo de motor proporciona uma queima mais homogênea e eficiente, reduzindo a emissão de material particulado e NO_x. O bloco do motor e seus componentes foram reforçados para suportar as altas temperaturas resultantes da combustão do gás natural, garantindo durabilidade e confiabilidade, de acordo com o manual do fabricante.

A Scania adotou um sistema de injeção multiponto sequencial, que injeta o gás diretamente na câmara de combustão de maneira precisa e controlada. Esse sistema ajusta continuamente a quantidade de combustível injetada com base na carga do motor e na demanda operacional, assegurando eficiência térmica e evitando desperdícios. A mistura ar-combustível é constantemente monitorada por sensores que enviam informações à Unidade de Controle Eletrônico, permitindo ajustes em tempo real.

O turbo alimentador de geometria variável desempenha um papel fundamental na manutenção da potência e torque do motor. Ele comprime o ar antes da admissão na câmara de combustão, aumentando a densidade do oxigênio e garantindo uma queima mais eficiente. Para maximizar o desempenho, o *intercooler* resfria esse ar comprimido antes que ele entre no motor, melhorando a combustão e reduzindo o desgaste dos componentes internos.

Além disso, O Sistema De Recirculação De Gases De Escape (EGR) foi projetado para reduzir a temperatura da combustão, minimizando a formação de NO_x. Esse mecanismo contribui para atender às normas ambientais mais rígidas, sem comprometer a eficiência energética. Os componentes críticos, como válvulas e sedes de válvulas, são fabricados com materiais de alta resistência térmica, garantindo maior vida útil ao motor.

O sistema de lubrificação do motor foi reforçado para lidar com as demandas térmicas do GNV. Ele incorpora um óleo de alta resistência que reduz o desgaste dos componentes internos e melhora a dissipação de calor, prevenindo falhas prematuras. O gerenciamento térmico do motor é otimizado por um sistema de resfriamento

aprimorado, garantindo que todas as partes operem dentro das faixas ideais de temperatura.

O armazenamento do gás natural no Scania G 460 foi projetado para oferecer alta segurança e eficiência energética. Os cilindros de gás são fabricados em ligas metálicas especiais e materiais compósitos reforçados, garantindo resistência a impactos e variações térmicas. Dependendo da configuração, o caminhão pode utilizar GNC armazenado sob alta pressão ou GNL mantido em estado líquido a temperaturas criogênicas extremamente baixas.

Os cilindros de GNC operam sob pressões elevadas, geralmente na faixa de 200 a 250 bar, e são equipados com válvulas de segurança para evitar pressurização em excesso, já os tanques de GNL necessitam de isolamento térmico avançado para manter o gás em estado líquido a temperaturas inferiores a -160°C , reduzindo a perda de combustível por evaporação.

Segundo sites oficiais da Scania, as linhas de pressão que transportam o gás dos cilindros até o motor são projetadas para suportar grandes variações de temperatura e pressão, evitando vazamentos e otimizando a eficiência do sistema. Sensores de pressão e temperatura instalados ao longo das linhas garantem um monitoramento contínuo do fluxo de combustível, ajustando a injeção conforme necessário para otimizar o consumo e a segurança operacional.

Para otimizar o abastecimento e a segurança operacional, o sistema conta com válvulas de enchimento de engate rápido, sensores de pressão e temperatura, e um controle eletrônico avançado que gerencia a distribuição do gás para o motor. A ECU monitora continuamente a pressão do combustível nos cilindros, ajustando a injeção conforme necessário para garantir eficiência e prevenir sobrecargas no sistema.

A autonomia do Scania G 460 pode chegar a 1.400 km, dependendo da configuração dos tanques e do tipo de gás utilizado. Os cilindros são instalados estrategicamente no chassi para manter uma distribuição equilibrada do peso e reduzir o impacto aerodinâmico. O sistema de isolamento térmico dos tanques de GNL garante a manutenção da temperatura ideal para evitar perdas por evaporação e maximizar a eficiência energética.

O Scania G 460 possui um avançado sistema de gerenciamento eletrônico que monitora e ajusta automaticamente os parâmetros do motor para manter a eficiência

e reduzir emissões. A ECU processa informações de diversos sensores espalhados pelo veículo, incluindo:

- Pressão e temperatura do gás armazenado nos cilindros.
- Qualidade e composição da mistura ar-combustível.
- Demanda instantânea de potência e rotação do motor.
- Eficiência da combustão, controlada por sensores de oxigênio no sistema de escape.

Com base nesses dados, o sistema ajusta dinamicamente a injeção de combustível e o tempo de ignição, garantindo maior estabilidade operacional, o software de controle é capaz de detectar variações na qualidade do gás utilizado, adaptando automaticamente a calibração do motor para otimizar o consumo e reduzir emissões.

O caminhão também conta com um sistema de diagnóstico remoto, que permite que operadores e gestores de frota monitorem o desempenho do veículo em tempo real, a conectividade embarcada possibilita a antecipação de manutenções preventivas, evitando falhas inesperadas e reduzindo custos operacionais.

3.2.8.2 IVECO Stralis NP

O IVECO Stralis NP representa um marco na transição para um transporte de cargas mais sustentável e eficiente. Essa tecnologia Gás Natural Veicular (GNV) aplicada ao Stralis NP não só reduz significativamente as emissões de poluentes, como também proporciona um desempenho robusto e confiável, adequado para longas distâncias. Combinando inovação e sustentabilidade, esse modelo da IVECO se destaca no setor de transporte pesado (IVECO, 2017).

A Figura 64 mostra uma visão geral do novo Stralis NP, um caminhão moderno pensado para ser mais econômico, confortável e menos poluente. Ele traz várias tecnologias novas, como um motor forte de até 460 cavalos, um sistema inteligente que ajuda a manter a direção mais eficiente (HI-CRUISE) e um câmbio automatizado com 12 marchas. Um dos grandes destaques é a sua autonomia: com dois tanques

de gás natural liquefeito (GNL), ele pode rodar até 1.600 km sem precisar reabastecer. O caminhão também vem com modo de direção econômica, sensores que avisam a pressão dos pneus e um eixo traseiro que reduz o consumo. A cabine larga oferece mais conforto para o motorista, e ainda há itens como luzes de LED (opcionais) e um sistema eletrônico que facilita o controle de várias funções do veículo.

Figura 64 – Novo Stralis NP e suas tecnologias



Fonte: Adaptado de IVECO (2018)

Conforme visto em documento técnico da IVECO de 2011 o coração do *Stralis NP* é o motor Cursor 9, desenvolvido especificamente para operar com gás natural. Esse motor de 8,7 litros entrega até 400 cavalos de potência e 1700 N.m. de torque números comparáveis aos motores a diesel equivalentes. A tecnologia de combustão estequiométrica otimiza a queima do gás, garantindo maior eficiência energética e menores emissões, além disso, a operação do motor é significativamente mais silenciosa, contribuindo para um menor impacto ambiental e conforto operacional.

O motor Cursor 9 possui um sistema de injeção multiponto de alta precisão, garantindo que a mistura ar-combustível seja homogênea em todas as condições de operação, a combustão controlada assegura que o aproveitamento energético seja

maximizado, enquanto as emissões de gases nocivos são minimizadas. Os pistões e componentes internos são projetados para suportar o funcionamento com gás natural, garantindo uma vida útil prolongada e um desempenho confiável ao longo do tempo.

Outro destaque é o turbocompressor de geometria variável, que permite uma resposta rápida em diferentes regimes de rotação, isso significa que o caminhão mantém um excelente desempenho tanto em trechos urbanos quanto em longas viagens rodoviárias, adaptando-se automaticamente às demandas de potência sem comprometer a eficiência. A refrigeração do motor também foi aprimorada para lidar com as especificidades da combustão do gás natural, garantindo um controle térmico adequado e evitando sobreaquecimentos.

O sistema de gerenciamento eletrônico (ECU) desempenha um papel fundamental no funcionamento do motor, ele monitora continuamente variáveis como pressão, temperatura e composição da mistura, realizando ajustes em tempo real para otimizar o desempenho e a economia de combustível.

O motor Cursor 9 não requer sistema de pós-tratamento de gases, eliminando a necessidade de Agente Redutor Líquido Automotivo (ARLA) 32 e filtros de partículas, o que reduz os custos operacionais e simplifica a manutenção, seu funcionamento do sistema GNV no Stralis NP envolve uma série de elementos projetados para garantir um desempenho otimizado e seguro. O gás natural pode ser armazenado de duas formas: na forma comprimida ou na forma liquefeita. Cada uma dessas formas possui suas particularidades operacionais, sendo que o GNL permite uma maior densidade energética e, consequentemente, maior autonomia.

Os tanques de armazenamento são construídos com materiais de alta resistência para suportar pressões elevadas e impactos mecânicos, garantindo a máxima segurança durante o transporte e operação, esses tanques são conectados a um conjunto de válvulas de segurança, responsáveis por controlar o fluxo de gás, evitar vazamentos e manter a pressão dentro dos limites seguros para a operação. (IVECO, 2018).

Após a saída do tanque, o gás passa pelo redutor de pressão, um componente essencial que converte a alta pressão do gás armazenado para uma pressão compatível com o sistema de injeção, esse processo garante um fornecimento estável e contínuo de combustível ao motor. (IVECO, 2011).

No motor os injetores de gás desempenham o papel crucial de administrar a quantidade exata de combustível a ser enviada para os cilindros, esses injetores são controlados pela ECU, que monitora variáveis como rotação do motor, temperatura e mistura ar-combustível para otimizar a combustão. Esse gerenciamento eletrônico avançado permite não apenas um desempenho eficiente, mas também uma operação mais limpa e econômica. (IVECO, 2018).

O Stralis NP pode ser abastecido tanto com GNV quanto com GNL, proporcionando uma flexibilidade operacional para diferentes necessidades de transporte. O sistema de abastecimento foi desenvolvido para ser intuitivo e seguro, reduzindo o tempo necessário para reabastecimento e minimizando perdas de gás durante o processo.

A autonomia do Stralis NP pode alcançar até 1.500 km com um único abastecimento, dependendo da configuração dos tanques e do tipo de combustível utilizado, essa capacidade de rodagem amplia significativamente as possibilidades logísticas, permitindo que o veículo percorra longas distâncias sem a necessidade de paradas frequentes para reabastecimento, o que se traduz em maior produtividade e eficiência para frotistas e transportadores.

A grande vantagem do Stralis NP está na sua capacidade de reduzir emissões poluentes e minimizar o impacto ambiental das operações de transporte, quando comparado aos motores a diesel convencionais, o Stralis NP consegue reduzir as emissões de CO₂ em até 95% quando utiliza biometano como combustível, contribuindo significativamente para a descarbonização do setor de transporte de cargas. Além disso, há uma diminuição expressiva na emissão de NOx (óxidos de nitrogênio) e praticamente a eliminação de partículas em suspensão, que são responsáveis por grande parte da poluição atmosférica nas áreas urbanas. (IVECO, 2017).

Outro aspecto relevante da tecnologia do Stralis NP é a eliminação da necessidade do uso de ARLA 32, isso reduz não apenas os custos operacionais, mas também a complexidade do sistema de pós-tratamento de gases, tornando a manutenção mais simples e econômica. O funcionamento do motor a gás também proporciona uma redução significativa no nível de ruído quando comparado aos

motores a diesel, o que contribui para a redução da poluição sonora, especialmente em operações urbanas e noturnas.

O Stralis NP não se destaca apenas pela sua eficiência energética e sustentabilidade, mas também pelo nível de conforto e tecnologia embarcada para o motorista. A cabine foi projetada para oferecer um ambiente ergonômico e espaçoso, ideal para longas jornadas de trabalho, os assentos são ajustáveis e contam com amortecimento pneumático, proporcionando maior conforto durante a condução. (IVECO, 2011).

A transmissão automatizada de 12 velocidades permite uma direção mais suave e menos cansativa, reduzindo a fadiga do condutor e aumentando a segurança nas estradas, o caminhão também conta com um conjunto de sistemas de assistência à condução, como controle eletrônico de estabilidade, freios ABS e sistema de monitoramento da pressão dos pneus, garantindo uma operação mais segura e eficiente.

A conectividade também é um ponto forte do Stralis NP, ele pode ser equipado com sistemas de telemetria avançada que permitem monitoramento remoto do desempenho do veículo, facilitando a manutenção preditiva e a gestão da frota de forma mais eficaz. Essas tecnologias não apenas aumentam a segurança e o conforto do motorista, mas também ajudam a otimizar o consumo de combustível e reduzir custos operacionais.

4 SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO MINERAÇÃO

A atividade mineral ocupa um papel estratégico na economia brasileira, não apenas como geradora de riqueza e empregos, mas também como impulsionadora do comércio exterior e da arrecadação fiscal. Em 2024, o setor mineral alcançou um faturamento expressivo de R\$ 270,8 bilhões, refletindo um avanço de 9,1% em comparação ao ano anterior, sendo o minério de ferro o principal responsável por esse desempenho (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2024).

No campo das exportações, o Brasil comercializou cerca de 400 milhões de toneladas de bens minerais no mesmo ano, o que gerou uma receita de US\$ 43,4 bilhões. A predominância do minério de ferro ficou evidente, correspondendo a 68,7% desse total exportado. As importações, por sua vez, somaram 41,2 milhões de toneladas e resultaram em um custo de US\$ 8,5 bilhões, valor consideravelmente inferior ao de 2023. Essa dinâmica comercial assegurou um saldo positivo de US\$ 34,9 bilhões para a balança mineral, o que representou quase metade do superávit da balança comercial brasileira (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2024).

Além do impacto econômico direto, o setor também teve relevância na geração de empregos e na arrecadação de tributos. Em 2024, foram criadas mais de 8,7 mil novas vagas, elevando o total de empregos diretos para aproximadamente 221,7 mil. No mesmo período, a arrecadação de tributos ligados à mineração totalizou R\$ 93,4 bilhões, dos quais R\$ 7,5 bilhões referem-se à Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), valor que superou em 8,6% o arrecadado no ano anterior.

4.1 Possíveis soluções sustentáveis no segmento de mineração

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a pressão por operações industriais mais sustentáveis têm incentivado transformações significativas no setor de mineração, entre essas mudanças, destaca-se a busca por soluções

energéticas mais limpas e eficientes para o transporte de cargas pesadas, tradicionalmente dependente de combustíveis fósseis.

Diante desse cenário, diferentes tecnologias vêm sendo estudadas e testadas, com o objetivo de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, otimizar o desempenho operacional e diminuir os custos de longo prazo, esse movimento não apenas acompanha a evolução tecnológica global, como também responde à necessidade de adaptação do setor mineral às novas exigências ambientais.

Entre as alternativas energéticas consideradas, três têm se mostrado especialmente promissoras: os veículos movidos a eletricidade, os que utilizam biodiesel e, mais recentemente, os alimentados por hidrogênio, cada uma dessas opções apresenta vantagens e desafios específicos em relação à eficiência energética, autonomia, custo de implementação, manutenção e impacto ambiental. A eletrificação, por exemplo, oferece um alto índice de eficiência e redução de custos operacionais, enquanto o biodiesel se destaca pela facilidade de integração às frotas existentes, já o hidrogênio desponta como uma solução de longo prazo para operações de grande escala, especialmente por sua autonomia estendida e ausência de emissões poluentes durante o uso.

Apesar das limitações técnicas e estruturais que ainda precisam ser superadas, como a baixa autonomia dos veículos elétricos e o alto custo da infraestrutura de hidrogênio, os avanços tecnológicos e os investimentos em pesquisa indicam um caminho promissor para a substituição progressiva dos combustíveis fósseis no transporte pesado da mineração.

Neste contexto, torna-se essencial analisar de forma crítica e comparativa cada uma dessas tecnologias, considerando não apenas seus aspectos técnicos, mas também os fatores econômicos e ambientais que envolvem sua adoção em larga escala. Nosso estudo busca justamente refletir sobre essas alternativas, destacando suas potencialidades e obstáculos no contexto das operações mineradoras.

4.1.1 Tecnologia a Eletricidade

A eletrificação do transporte pesado, especialmente na mineração, tem ganhado relevância devido à necessidade global de reduzir emissões e aumentar a eficiência operacional, os caminhões elétricos apresentam eficiência energética de até 85%, muito superior à dos modelos a diesel, cuja eficiência gira em torno de 35% a 40% (IEA, 2022). Essa eficiência se traduz em menor consumo energético, algo em torno de 0,8 a 1 kWh por tonelada-milha (KÖNIG ET AL., 2021).

Em relação aos custos, os veículos elétricos proporcionam redução significativa nos gastos com combustível (até 70%) e manutenção (entre 30% e 40%), devido à menor quantidade de partes móveis (RAJPER & ALBRECHT, 2020). Mesmo com investimento inicial elevado, o custo total de propriedade pode ser inferior ao de veículos convencionais em longo prazo, com economias acumuladas superiores a US\$ 4 milhões ao longo de 15 a 20 anos em grandes operações (WOLSKI ET AL., 2021).

Contudo, a autonomia limitada em média de 150 a 250 km e o tempo de recarga elevado (2 a 3 horas) são desafios importantes. Além disso, a infraestrutura de carregamento ainda é escassa em regiões remotas, típicas de operações mineradoras conforme Mazzarella et al. (2021). O desempenho das baterias também sofre impacto negativo em ambientes com temperaturas extremas.

4.1.2 Tecnologia a Biodiesel

O biodiesel destaca-se como alternativa viável de transição por sua compatibilidade com motores a diesel convencionais, exigindo apenas pequenas adaptações. Segundo dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP, 2023), o biodiesel apresenta desempenho similar ao diesel fóssil em termos de consumo, o que não compromete a operação dos caminhões de mineração.

A principal vantagem está na facilidade de implementação, aproveitando a infraestrutura existente de abastecimento e manutenção. Ainda que o preço por litro possa variar, o biodiesel pode ser competitivo em locais com forte produção agrícola

(Brito et al., 2022). Em termos ambientais, sua utilização permite redução de até 70% nas emissões líquidas de CO₂, dependendo da matéria-prima utilizada (NOGUEIRA & CAPAZ, 2021).

Entretanto, o combustível possui menor estabilidade oxidativa, o que dificulta seu armazenamento prolongado. Há também preocupação quanto à concorrência com a produção de alimentos, uma vez que o biodiesel utiliza óleos vegetais e gorduras que poderiam ser destinados à alimentação humana ou animal (MIRANDA et al., 2022).

4.1.3 Tecnologia a Hidrogênio

A tecnologia baseada em células a combustível de hidrogênio é considerada uma das soluções mais promissoras para o transporte pesado na mineração. Essa tecnologia oferece alta autonomia, com média de 700 km por abastecimento, e tempo de reabastecimento muito reduzido, cerca de 10 minutos.

Em termos de consumo, um caminhão a hidrogênio consome cerca de 8 kg de H₂ por 100 km (IEA, 2022). O funcionamento não é afetado por variações térmicas extremas, o que favorece seu uso em ambientes hostis como regiões desérticas ou polares (AFC ENERGY, 2023).

O maior benefício está na emissão zero de carbono durante a operação, com subproduto apenas de vapor d'água. Essa característica torna o hidrogênio ideal para operações em áreas ambientalmente sensíveis ou sujeitas a regulamentações rigorosas (MAZZARELLA ET AL., 2021).

Para *International Renewable Energy Agency* (IRENA) (2022) a principal barreira está no custo: tanto dos caminhões quanto da infraestrutura de produção, armazenamento e distribuição do hidrogênio. O hidrogênio verde, produzido com fontes renováveis, ainda possui custo elevado, mas há projeções de queda para cerca de US\$ 0,50/kg até 2030, tornando-o economicamente competitivo.

A partir dos dados analisados, conclui-se que, embora todas as alternativas apresentem benefícios relevantes, o hidrogênio se destaca como a solução mais viável para operações de grande porte, como a mineração. Isso se deve à sua alta

autonomia, reabastecimento rápido, desempenho robusto e zero emissão direta de poluentes.

Os caminhões elétricos são ideais para rotas fixas e ambientes com infraestrutura consolidada, oferecendo alta eficiência e baixo custo operacional, já o biodiesel, apesar de ser uma alternativa prática e de fácil aplicação imediata, possui limitações relacionadas à sustentabilidade em larga escala e menor redução efetiva de emissões.

Nesse cenário, o hidrogênio verde emerge como uma alternativa sustentável, produzido por eletrólise da água utilizando fontes renováveis como hidrelétricas, energia eólica e solar. Esse hidrogênio, livre de carbono, contribui para as metas internacionais de redução das emissões de CO₂.

Segundo informações de Estêvão (2008), o hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo, representa aproximadamente 70% da matéria cósmica. Na Terra, devido à sua alta reatividade, não é encontrado em estado puro, estando predominantemente presente na água e em compostos orgânicos. Suas características únicas, como leveza e alta densidade energética, têm levado à sua exploração como fonte de energia desde o século XIX. A adoção do hidrogênio como combustível sustentável em veículos de mineração traz diversos benefícios para o meio ambiente. Serão explorados aspectos como produção e armazenamento de hidrogênio verde, adaptação de veículos, impactos ambientais e desafios econômicos associados à implementação dessa tecnologia no setor mineral.

4.2 Utilização do Hidrogênio como Combustível

Segundo Carrión (2021), a exploração do hidrogênio como combustível teve início no século XIX, em 1807, o engenheiro suíço François Isaac de Rivaz projetou o primeiro motor de combustão interna alimentado por uma mistura de hidrogênio e oxigênio, realizando o primeiro percurso de um veículo movido a hidrogênio.

Em 1839, após inventar a pilha de zinco e platina, William Grove desenvolve a primeira célula de combustível que é considerada hoje por muitos a fonte de energia do futuro, nas pilhas comuns, quando os reagentes terminam, a pilha para de funcionar. Nas células de combustível, os reagentes são fornecidos à pilha como se fossem os “combustíveis” da reação, em analogia aos combustíveis dos automóveis, só que, nesse caso, não ocorre reação de combustão.

Enquanto houver combustível, haverá energia, a célula de combustível de Grove utiliza o hidrogênio e o oxigênio como combustível e o produto da reação é água (H_2O), a célula de Grove não fornece voltagem suficiente para utilização prática, mas foi um marco inicial na exploração do hidrogênio como fonte de energia (Nisenbaum, 2017)

Apesar dessa descoberta pioneira, as células de combustível permaneceram em grande parte como curiosidades científicas por mais de um século, foi somente na década de 1960 que elas encontraram aplicações práticas significativas, notadamente no programa espacial da NASA com células a combustível de 12kW. As células de combustível foram utilizadas nas missões Apollo para fornecer eletricidade e água potável aos astronautas, demonstrando sua viabilidade em ambientes extremos, conforme dados apresentados por Gonzales (1989).

Nas décadas seguintes, avanços tecnológicos permitiram a miniaturização e o aprimoramento das células de combustível, tornando-as mais acessíveis para aplicações comerciais. A introdução de materiais como o Nafion, uma membrana condutora de prótons, e a redução na quantidade de platina necessária como catalisador contribuíram para a viabilidade econômica desses sistemas.

O emprego de veículos impulsionados por hidrogênio apresenta diversos benefícios, sobretudo quando comparado aos motores convencionais a combustão interna, a produção de energia nesses automóveis ocorre por meio de células a combustível, responsáveis por transformar o hidrogênio em eletricidade, que alimenta o motor elétrico, esse motor converte a energia elétrica em movimento, promovendo a locomoção do veículo.

Entre as vantagens mais relevantes desse sistema, destaca-se a elevada eficiência energética do motor elétrico, que supera os motores a combustão ao aproveitar uma parcela maior da energia disponível para gerar movimento. Outro aspecto positivo é que esse tipo de veículo não libera poluentes atmosféricos localmente, como CO₂, óxidos de nitrogênio (NOx) ou material particulado (MP), visto que o único resíduo do processo químico nas células a combustível é a água.

4.2.1 Células de Combustível

De acordo com Gotz & Linard (1999) o funcionamento de uma célula a combustível de hidrogênio é baseado em um processo químico simples, mas eficiente, que converte hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂) em eletricidade, água e calor. O princípio fundamental por trás da célula a combustível é a reação eletroquímica entre o hidrogênio e o oxigênio, sem a necessidade de combustão. Aqui está um detalhamento do processo:

Componentes principais de uma célula a combustível de hidrogênio:

Anodo: O lado onde o hidrogênio é introduzido.

Cátodo: O lado onde o oxigênio (ou ar) é introduzido.

Eletrólito: O material que permite que os prótons (íons de hidrogênio) passem de um lado para o outro.

Membrana de troca de prótons (PEM - *Proton Exchange Membrane*): Uma membrana semipermeável que separa o anodo e o cátodo e permite a passagem de prótons, mas bloqueia a passagem de elétrons.

Etapas do funcionamento:

O hidrogênio (H₂) é introduzido no anodo da célula a combustível. O anodo é revestido com um catalisador, geralmente platina, que facilita a separação do hidrogênio em seus dois componentes: prótons (H⁺) e elétrons (e⁻).

O hidrogênio se dissocia no anodo em prótons (íons H^+) e elétrons (e^-). Os elétrons não podem atravessar diretamente o eletrólito e, por isso, seguem por um circuito externo. Esse movimento de elétrons pelo circuito gera eletricidade, que pode ser usada para alimentar motores elétricos, baterias ou outros dispositivos.

Os prótons (H^+) gerados no anodo passam através do eletrólito (ou membrana de troca de prótons), que é um material condutor de íons, mas isolante para elétrons. O eletrólito permite que apenas os prótons se movam para o cátodo, mas bloqueia os elétrons, forçando-os a seguir pelo circuito externo.

No cátodo, o oxigênio (O_2) do ar é introduzido. Os prótons que viajaram através do eletrólito se encontram com o oxigênio e os elétrons que viajaram pelo circuito externo. No cátodo, ocorre uma reação de redução onde os prótons, elétrons e oxigênio se combinam para formar água (H_2O).

O resultado da reação é a produção de eletricidade, água e uma pequena quantidade de calor. A água gerada no cátodo é o único subproduto da reação, o que torna a célula a combustível uma tecnologia extremamente limpa. A eletricidade gerada é o que pode ser utilizada para alimentar veículos ou outras aplicações.

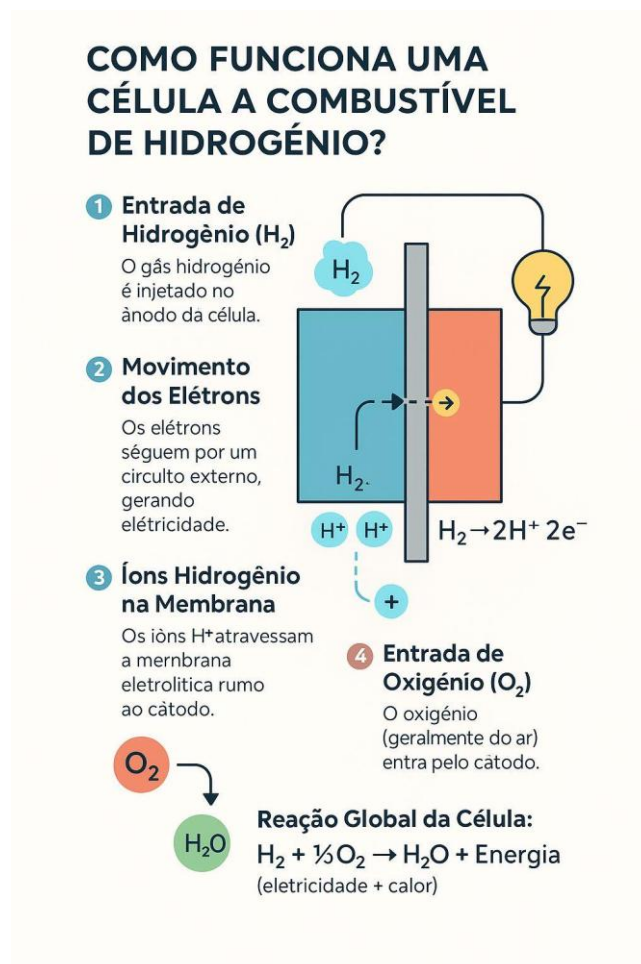
Na célula a combustível, ocorre uma separação controlada entre cargas positivas e negativas, viabilizada por uma membrana seletiva que conduz íons, mas impede a passagem de elétrons. Esse material especializado direciona apenas as partículas com carga positiva ao lado oposto do sistema, enquanto os elétrons percorrem um caminho alternativo externo.

Do outro lado, o gás oxigênio proveniente do ambiente atmosférico é introduzido e participa da reação eletroquímica final. Nesse ponto, as partículas migradas pela membrana se unem aos elétrons que chegaram via circuito externo, promovendo a formação de uma nova substância: a molécula de água.

Além da energia elétrica gerada nesse processo, há também uma liberação de calor, mas sem a emissão de resíduos poluentes.

Esse funcionamento é esquematizado na Figura 65, elaborada com base na proposta visual de Gotz & Linard (1999), e ajuda a ilustrar de maneira didática como ocorre a conversão energética no sistema.

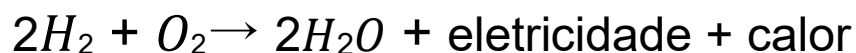
Figura 65 – Funcionamento de uma célula a combustível de Hidrogênio



Fonte: Autores, 2025.

A reação geral que ocorre em uma célula a combustível de hidrogênio pode ser representada como:

Equação 1 – Reação Célula de Combustível



Fonte: Gotz & Linard (1999)

Outro aspecto importante desses veículos é o sistema de recuperação de energia, que funciona de maneira semelhante aos veículos elétricos convencionais, durante as frenagens, parte da energia gerada é convertida de volta em eletricidade e armazenada nas baterias para uso posterior, o que contribui para aumentar a eficiência energética geral e a autonomia do veículo.

Quando comparados aos veículos elétricos a bateria, os veículos pesados movidos a hidrogênio oferecem uma autonomia significativamente superior, o hidrogênio possui uma densidade energética muito maior do que as baterias convencionais, o que significa que, com um tanque cheio de hidrogênio, um caminhão pode percorrer distâncias muito mais longas sem necessidade de reabastecimento. Isso é fundamental para veículos de carga pesada, que operam em longas distâncias. Além disso, os motores movidos a hidrogênio podem ter desempenho semelhante ao de motores a diesel, permitindo que esses veículos transportem grandes volumes de carga e operem em condições desafiadoras. (GOTZ & LINARD, 1999)

No que diz respeito ao reabastecimento, o hidrogênio oferece benefícios consideráveis, o processo de abastecimento é significativamente mais ágil do que o tempo necessário para recarregar baterias elétricas, enquanto automóveis elétricos podem demandar várias horas para uma carga completa, veículos pesados, como caminhões movidos a hidrogênio, podem ser reabastecidos em questão de minutos, de maneira semelhante ao abastecimento com combustíveis fósseis convencionais. Apesar disso, a rede de estações de hidrogênio ainda é pouco desenvolvida quando comparada à estrutura já consolidada dos postos de combustíveis tradicionais.

Atualmente, as células de combustível são utilizadas em diversas aplicações, desde veículos automotivos até sistemas estacionários de geração de energia, elas funcionam convertendo hidrogênio e oxigênio em eletricidade, com água como único subproduto, o que as torna uma opção limpa e eficiente.

Por exemplo, veículos como o Toyota Mirai e o Hyundai NEXO utilizam células de combustível para oferecer autônominas superiores a 600 km, com tempos de reabastecimento comparáveis aos de veículos a combustíveis fósseis, conforme o próprio site das montadoras nos mostra.

No entanto, desafios persistem, especialmente relacionados à produção e distribuição do hidrogênio, a produção de hidrogênio verde, obtido a partir de fontes renováveis, ainda é limitada e cara. Além disso, a infraestrutura de abastecimento é escassa em muitas regiões, o que restringe a adoção em larga escala.

Em resumo, o hidrogênio evoluiu de um estudo científico para uma promissora fonte de energia limpa, com investimentos contínuos em pesquisa e desenvolvimento, espera-se que as tecnologias associadas ao hidrogênio desempenhem um papel crucial na transição para uma matriz energética mais sustentável.

Atualmente existem 5 tipos de células a combustível de hidrogênio, mas as células do tipo alcalina *Alkaline Fuel Cell* (AFC) têm um papel importante somente em viagens espaciais, não apresentando aplicação terrestre, devido ao fato de utilizarem somente hidrogênio e oxigênio ultrapuros, além disso, funcionam a uma baixa temperatura de operação e necessitam de um processo relativamente complicado para a remoção da água do eletrólito. Entretanto, este tipo de células foi o precursor das células mais modernas, conforme apontado por Gotz & Linard (1999).

Com o avanço das tecnologias de células a combustível, outros tipos tornaram-se mais viáveis para aplicações terrestres, como as células de membrana de troca de prótons, que se destacam pela rápida partida, operação em baixas temperaturas e dimensões compactas características ideais para veículos automotivos. Além disso, células como as de óxido sólido e as de carbonato fundido operam em temperaturas mais elevadas e são mais indicadas para aplicações estacionárias e geração distribuída de energia. Essas variações tecnológicas refletem o esforço contínuo da indústria em adaptar o uso do hidrogênio a diferentes contextos energéticos, priorizando eficiência, durabilidade e viabilidade econômica.

Finalmente, a expansão da infraestrutura para produção, armazenamento e distribuição de hidrogênio é um desafio essencial para a adoção em larga escala dessas tecnologias. Investimentos em redes de abastecimento e na geração de hidrogênio verde a partir de fontes renováveis são fundamentais para garantir a sustentabilidade e o impacto ambiental reduzido dessas soluções.

Na Tabela 1 é apresentado os diferentes tipos de células a combustível, suas vantagens, desvantagens e aplicações.

Tabela 1 – Diferentes tipos de células a combustível

| Tipo | Eletrólito (espécie transportada) | Faixa de Temp. (°C) | Vantagens | Desvantagens | Aplicações |
|----------------------------|---|---------------------|---|---|---|
| Alcalina (AFC) | KOH (OH ⁻) | 60 – 90 | - Alta eficiência (83% teórica) | - Sensível a CO ₂ - Gases ultra puros, sem reforma do combustível | - Espaçonaves - Aplicações militares |
| Membrana (PEMFC) | Polímero: Nafion® (H ₃ O ⁺) | 80 – 90 | - Altas densidade de - Operação flexível | - Custo da membrana potência e eficiência - Contaminação do catalisador com CO | - Veículos automotores e catalisador - Espaçonaves - Mobilidade |
| Ácido fosfórico (PAFC) | H ₃ PO ₃ (H ₃ O ⁺) | 160 – 200 | - Maior desenvolvimento tecnológico | - Controle da porosidade do eletrodo - Sensibilidade a CO - Eficiência limitada pela corrosão | - Unidades estacionárias - Unidades estacionárias (100 kW a alguns MW) - Cogeração eletricidade/calor |
| Carbonatos fundidos (MCFC) | Carbonatos Fundidos (CO ₃ ²⁻) | 650 – 700 | - Tolerância a CO/CO ₂ - Eletrodos à base de Ni | - Problemas de materiais - Necessidade da reciclagem de CO ₂ - Interface trifásica de difícil controle | - Unidades estacionárias de algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor |
| Cerâmicas (SOFC) | ZrO ₂ (O ²⁻) | 800 – 900 | - Alta eficiência (cinética favorável) - A reforma do combustível pode ser feita na célula | - Problemas de materiais - Expansão térmica - Necessidade de pré-reforma | - Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW - Cogeração eletricidade/calor |

Fonte: Gotz & Linard, 1999.

4.2.2 Utilização na indústria Automotiva

A aplicação do hidrogênio na indústria automotiva ganhou destaque no século XX, na década de 1970, a patente de Paul Dieges permitiu que motores de combustão interna existentes fossem adaptados para utilizar hidrogênio, oferecendo uma alternativa aos combustíveis fósseis (AKASHI, 2023).

A utilização do hidrogênio como fonte de energia para movimentar veículos tem se destacado progressivamente no setor automotivo, impulsionando investimentos de diversas fabricantes em modelos leves e pesados equipados com células a combustível, essa tecnologia consiste na transformação do hidrogênio em eletricidade. A partir de uma reação com o oxigênio que ocorre no interior da célula de combustível, trata-se de um processo limpo, cujo único subproduto é o vapor d'água, o que torna essa alternativa altamente promissora em substituição aos

combustíveis de origem fóssil. Funcionamento de uma célula a combustível de Hidrogênio.

O Mirai, visto na Figura 66, por exemplo, é um sedã com autonomia superior a 600 km, já explanado anteriormente, e abastecimento em menos de cinco minutos, já disponível em mercados como o da Califórnia, onde existe infraestrutura de hidrogênio.

Figura 66 – Veículo Toyota Mirai movido a H₂



Fonte: The Sun, 2025

O Hyundai NEXO segue a mesma linha, com alcance de até 660 km e uso em projetos experimentais no Brasil, como um teste de hidrogênio renovável a partir do etanol realizado pela USP. Já o Honda *Clarity Fuel Cell* funciona de maneira semelhante, armazenando hidrogênio em tanques de alta pressão e utilizando uma bateria para garantir desempenho em momentos de maior exigência do motor.

Segundo registros da Hyundai (2025), no segmento de veículos pesados, a tecnologia também tem avançado, um dos exemplos mais emblemáticos é o Hyundai XCIENT Fuel Cell, um caminhão com dois sistemas de célula de combustível que, juntos, fornecem 180 kW de potência, movimentando um motor elétrico de 350 kW.

A autonomia do veículo supera os 400 km, e o tempo de abastecimento varia entre 8 e 20 minutos. Na Suíça, uma frota desses caminhões percorreu mais de 10 milhões de quilômetros em menos de quatro anos, deixando de emitir cerca de 6.300 toneladas de CO₂, segundo publicação em site da montadora Hyundai (2024), o

modelo também foi anunciado para uso no Uruguai, em um projeto que integra produção de hidrogênio verde com transporte florestal.

Outro exemplo relevante é o ônibus urbano Toyota Sora, que utiliza dois motores elétricos alimentados por hidrogênio, com capacidade para transportar até 78 passageiros e servir como fonte emergencial de energia elétrica, com cerca de 200 km de autonomia, o Sora representa uma aplicação prática da tecnologia em centros urbanos.

Apesar dos benefícios ambientais e da rapidez no processo de reabastecimento, os veículos movidos a hidrogênio ainda enfrentam obstáculos significativos, um dos principais desafios está relacionado à infraestrutura de distribuição, que permanece pouco desenvolvida na maioria dos países, dificultando sua implementação em escala ampla. Outro ponto crítico é o alto custo de produção do hidrogênio verde, obtido por meio de fontes de energia renováveis, que ainda é superior ao do hidrogênio cinza, produzido a partir de combustíveis fósseis, no entanto, espera-se que esse cenário se altere com o progresso tecnológico e o aumento da produção em larga escala.

Em termos de manutenção, veículos movidos a célula de combustível tendem a apresentar menores custos operacionais ao longo do tempo. Isso ocorre porque esses sistemas possuem menos peças móveis em comparação aos motores a combustão, o que reduz o desgaste e a necessidade de trocas constantes de componentes, ainda assim, os custos iniciais de aquisição permanecem altos, devido à complexidade e à novidade da tecnologia.

O cenário atual indica que o hidrogênio tem potencial real para transformar o setor de transportes, especialmente em segmentos onde a eletrificação via baterias encontra limitações, como no transporte pesado ou em operações de longa distância, à medida que a infraestrutura evolui e os custos de produção diminuem, é esperado que o hidrogênio ganhe espaço como vetor de descarbonização global na mobilidade.

4.3 Produção do Hidrogênio

O hidrogênio tem se destacado como uma alternativa viável para auxiliar na diminuição das emissões de gases poluentes, sua aplicação é versátil, podendo ser empregado como fonte energética em processos industriais, no setor de transportes e na geração elétrica, com a vantagem de não emitir poluentes durante seu uso. No entanto, um fator que deve ser considerado são os impactos ambientais que variam significativamente de acordo com o método utilizado em sua produção.

Hoje, a produção de hidrogênio é dividida em três categorias principais, chamadas de hidrogênio verde, cinza e azul. Essa classificação tem menos a ver com a cor do gás e mais com seu impacto ambiental.

4.3.1 Hidrogênio Verde

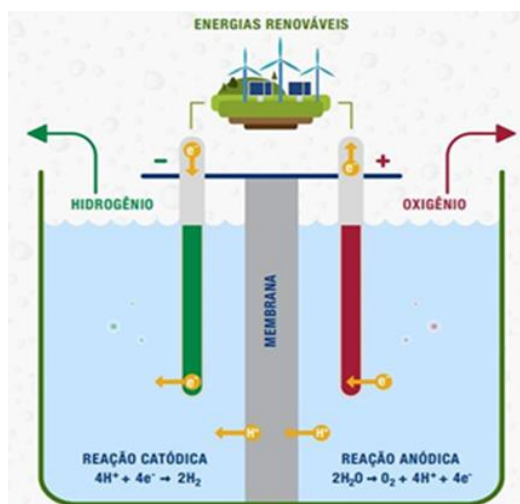
Produzido por eletrólise da água usando eletricidade. É a forma mais limpa de produção de hidrogênio, pois não emite CO₂, a origem da energia utilizada na produção de hidrogênio é um fator decisivo para sua classificação quanto à sustentabilidade. Quando são empregadas fontes renováveis, como a solar ou a eólica, o hidrogênio resultante é considerado ambientalmente sustentável.

De acordo com estimativas da IEA (2020), a adoção desse modelo de produção tem o potencial de reduzir em cerca de 830 milhões de toneladas as emissões anuais de gases poluentes, representando um avanço significativo no combate às mudanças climáticas.

Conforme ECOS (2025), no caso da eletrólise da água, o processo ocorre em um equipamento chamado eletrólizador, que contém água misturada com sais minerais. Uma fonte renovável de eletricidade é então conectada aos eletrodos imersos nessa solução, a corrente elétrica aplicada provoca reações de oxirredução, que promovem a separação das moléculas de água em seus dois componentes básicos: hidrogênio (H₂) e oxigênio (O₂).

Esse procedimento é limpo, eficiente e promissor como alternativa de baixo impacto ambiental para a geração de hidrogênio. A Figura 67 demonstra o processo.

Figura 67 – Processo de eletrólise para a obtenção do hidrogênio



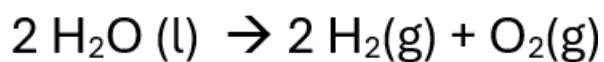
Fonte: Sales, 2025

Reação química:

A eletrólise da água separa a molécula de H_2O em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2).

Reação global:

Equação 2 – Reação Global Eletrólise

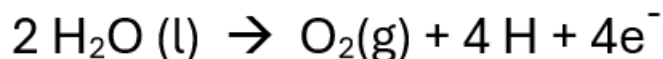


Fonte: ECOS (2025)

Ocorre em um eletrólito com dois eletrodos (ânodo e cátodo).

No ânodo (oxidação):

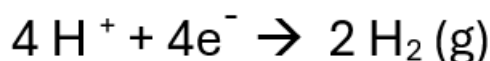
Equação 3 – Equação de Oxidação Eletrólise



Fonte: ECOS (2025)

No cátodo (redução):

Equação 4 – Equação de redução Eletrólise



Fonte: ECOS (2025)

A produção do hidrogênio verde não gera nenhuma emissão direta de carbono. Se a energia usada for 100% renovável, o impacto ambiental é mínimo, o único subproduto da geração do hidrogênio verde é o oxigênio que é liberado na atmosfera.

4.3.2 Hidrogênio Cinza

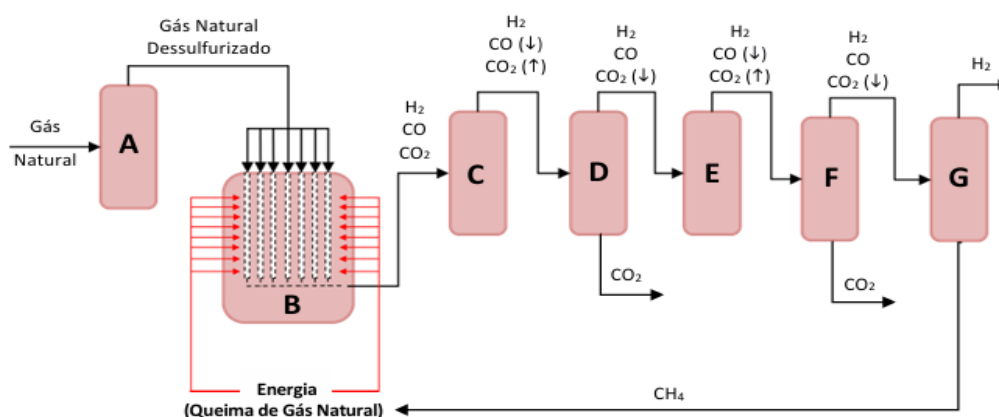
Atualmente, a tecnologia de produção de hidrogênio cinza é uma das mais amplamente empregadas em escala global, sendo considerada uma das principais rotas tecnológicas para a obtenção desse gás no curto prazo. Esse método se destaca por sua elevada eficiência térmica e alto aproveitamento energético, alcançando rendimentos próximos a 80%, contudo, apresenta como desvantagem a emissão significativa de GEE, o que compromete seu perfil ambiental, conforme apresentado por Leão (2023).

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2025) De maneira geral, o processo de reforma a vapor ocorre por meio de uma reação química entre vapor d'água e gás natural, viabilizada com o uso de catalisadores dentro de um reator

específico. A partir dessa reação, obtém-se uma mistura composta por hidrogênio (H_2), CO, CO_2 e traços de fuligem.

Em uma etapa subsequente, essa mistura é submetida a uma nova reação com o objetivo de aumentar a geração de hidrogênio. Entretanto, essa fase também resulta na emissão de CO_2 como subproduto, conforme ilustrado na Figura 68, evidenciando a importância da adoção de tecnologias complementares que reduzam os impactos ambientais desse processo.

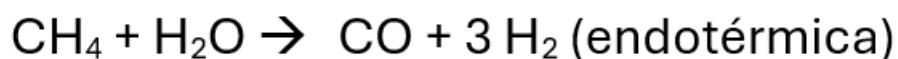
Figura 68 – Processo de produção do H_2 a partir da Reforma a vapor



Fonte: EPE (2025)

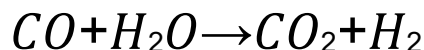
Reações químicas:

Equação 5 – Reforma do metano com vapor d'água:



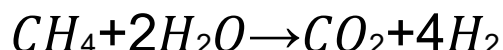
Fonte: EPE (2025)

Equação 6 – Reação de deslocamento do gás de água:



Fonte: EPE (2025)

Equação 7 – Reação global (Hidrogênio Cinza):



Fonte: EPE (2025)

De acordo com dados da *International Energy Agency* (IEA) 2020, cada tonelada de hidrogênio cinza produzida libera cerca de 10 toneladas de CO₂.

4.3.3 Hidrogênio Azul

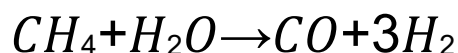
Conforme relatado por Leão (2023), com a finalidade de reduzir os impactos ambientais provocados pela emissão de monóxido e dióxido de carbono durante processos industriais, vêm sendo implementadas estratégias de captura, aproveitamento e armazenamento de carbono, conhecidas pela sigla em inglês *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS).

Essas tecnologias têm como principal objetivo mitigar ou impedir a liberação de CO₂ na atmosfera, além de contribuírem para práticas mais sustentáveis, elas permitem a reutilização do dióxido de carbono em diferentes aplicações, no entanto, a incorporação dessas soluções tende a elevar os custos operacionais dos processos nos quais são inseridas.

Reações químicas:

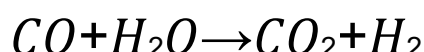
As mesmas do hidrogênio cinza:

Equação 8 – Reação de Reforma



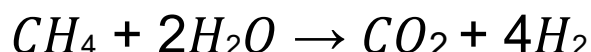
Fonte: EPE (2025)

Equação 9 – Reação de Deslocamento



Fonte: EPE (2025)

Equação 10 – Reação Global (Hidrogênio Azul)



Fonte: EPE (2025)

O CO₂ gerado é capturado e armazenado em reservatórios geológicos ou usados em processos industriais. Não é neutro em carbono, mas reduz bastante as emissões comparado ao hidrogênio cinza. Cada tonelada de hidrogênio azul produzida libera cerca de 1 a 3 toneladas de CO₂, conforme dado apresentado pela IEA (2020).

4.4 Armazenamento do Hidrogênio

Devido à sua baixa densidade em condições normais, o hidrogênio precisa ser armazenado de forma comprimida, liquefeita ou em materiais sólidos, como hidretos metálicos, cada um com vantagens e limitações quanto à segurança, densidade energética e custo, o desenvolvimento de tecnologias eficazes de armazenamento é essencial para viabilizar o uso do hidrogênio em setores como transporte, geração de energia e indústria.

O armazenamento do hidrogênio representa um dos principais entraves à sua consolidação como vetor energético, principalmente devido à sua baixa densidade por volume e à exigência de tecnologias que aliem eficiência, segurança e viabilidade econômica. Atualmente, são três as formas predominantes de armazenar hidrogênio: sob a forma gasosa comprimida, em estado líquido criogênico e em materiais sólidos. A seguir, cada uma dessas abordagens é descrita juntamente com suas respectivas eficiências:

4.4.1 Armazenamento de Hidrogênio Gasoso Comprimido

O hidrogênio é armazenado em tanques de alta pressão, visto na Figura 69, geralmente entre 350 e 700 bar. Essa é a forma mais comum de armazenamento, especialmente em aplicações veiculares.

Figura 69 – Tanque de armazenamento do hidrogênio gasoso em um caminhão



Fonte: Istock, 2021

Embora o armazenamento de hidrogênio em forma gasosa apresente eficiência energética relativamente elevada, existem perdas associadas ao processo de compressão. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI), estima-se que a energia necessária para esse procedimento corresponda a aproximadamente 2% a 3% do poder calorífico inferior do hidrogênio.

De acordo com Leão (2023), um dos principais obstáculos no armazenamento do hidrogênio gasoso está relacionado ao desenvolvimento de soluções capazes de diminuir o volume e o peso dos cilindros, ao mesmo tempo em que se busca aumentar

sua capacidade de contenção, esse desafio é agravado pelas altas pressões exigidas nesse tipo de tecnologia, tornando a segurança um fator crucial que requer constante vigilância.

Além das dificuldades técnicas e operacionais, há uma preocupação significativa quanto ao rendimento energético do processo, a energia gasta na compressão do hidrogênio pode ser expressiva, o que afeta sua viabilidade tanto econômica quanto ambiental. Nesse sentido, esforços contínuos têm sido direcionados para a redução do consumo energético envolvido nesse procedimento, com o intuito de tornar o armazenamento gasoso mais eficiente e aplicável em larga escala.

4.4.2 Armazenamento de Hidrogênio Líquido (Criogênico)

Outra possibilidade de armazenamento é o hidrogênio em estado líquido (LH_2), obtido mediante seu resfriamento a temperaturas extremamente baixas, aproximadamente -253°C , nessa forma, o hidrogênio atinge um alto nível de pureza e torna-se mais fácil de ser transportado, principalmente por meio de rodovias.

Por essa razão, ele não pode ser mantido indefinidamente nesse estado e requer recipientes com alta eficiência térmica, preferencialmente tanques esféricos, que apresentam menor superfície de contato para um mesmo volume, o que reduz a transferência de calor e, conseqüentemente, as perdas, conforme a Figura 70.

Figura 70 – Tanque de armazenamento do hidrogênio líquido



Fonte: Korea Advanced Institute of Science and Technology (2022)

Além do hidrogênio líquido, outra tecnologia para transporte do hidrogênio envolve os chamados *Liquid Organic Hydrogen Carriers* (LOHC), compostos orgânicos insaturados que conseguem armazenar quantidades significativas de hidrogênio por meio de reações químicas de hidrogenação e desidrogenação, conforme apontado por Giz (2021).

Nesse processo, o hidrogênio é incorporado às moléculas orgânicas por meio da hidrogenação e, posteriormente, pode ser liberado por meio da desidrogenação que é o procedimento reversível e controlado.

Uma das principais vantagens dos LOHCs é a semelhança com combustíveis líquidos tradicionais, como o diesel ou a gasolina, o que permite o aproveitamento da infraestrutura de transporte e armazenamento já existente, os compostos LOHC podem conservar o hidrogênio por longos períodos sem perdas significativas, superando, nesse aspecto, o hidrogênio líquido.

Conforme ressalta Leão (2023), outra possibilidade é a conversão do hidrogênio em amônia (NH_3), o que permite seu uso direto em setores como a indústria de fertilizantes, combustíveis marítimos ou até mesmo na geração de energia por combustão. A amônia tem a vantagem de não exigir reconversão para hidrogênio em determinados usos, embora apresente menor pureza e alto grau de toxicidade, o que limita seu armazenamento em regiões residenciais.

A liquefação do hidrogênio consome uma quantidade significativa de energia, representando aproximadamente 30% a 40% do conteúdo energético do hidrogênio, conforme dados da Universidade Central da Florida (UCF).

4.4.3 Armazenamento em Materiais Sólidos

O armazenamento de hidrogênio em estado sólido é realizado, principalmente, por meio de compostos conhecidos como hidretos metálicos, que é uma tecnologia que ainda se encontra em estágio experimental e de desenvolvimento, esses materiais apresentam a capacidade de incorporar o hidrogênio em sua estrutura cristalina, sob determinadas condições de alta pressão e temperatura moderada, formando compostos químicos estáveis.

De maneira simplificada, conforme afirma Leão (2024), esses metais funcionam como esponjas, absorvendo o hidrogênio nas condições específicas mencionadas, quando submetidos a aquecimento sob baixa pressão, conseguem liberar o hidrogênio de forma controlada. Essa característica representa uma vantagem significativa, pois a liberação do gás não exige pressões elevadas, tornando o processo relativamente mais seguro e tecnicamente atrativo.

Segundo Leão (2023), dentre os materiais mais estudados para esse tipo de armazenamento, destacam-se ligas metálicas compostas por magnésio, níquel, aço e titânio, no entanto, embora promissor, esse método enfrenta desafios importantes. Um dos principais obstáculos é a baixa densidade energética desses compostos, pois o hidrogênio representa, em média, apenas 8% da massa total do material. O custo elevado, aliado à sensibilidade à contaminação (que pode comprometer a capacidade de absorção e liberação do gás), dificulta sua aplicação prática em larga escala.

Por esses motivos, o armazenamento de hidrogênio em forma sólida, embora repleto de potencial técnico, ainda não se mostra plenamente viável para uso comercial em curto prazo.

4.5 Adaptação para veículos

Nesse contexto destacado acima, o desenvolvimento de veículos movidos a hidrogênio representa um passo importante rumo à mobilidade sustentável. Esses veículos utilizam células a combustível, que convertem o hidrogênio em eletricidade para alimentar motores elétricos, emitindo apenas vapor d'água como subproduto, para viabilizar essa tecnologia, é necessário superar desafios como a eficiência das células, a segurança no armazenamento do hidrogênio e o custo dos componentes.

A transição para veículos movidos a hidrogênio, especialmente no setor de transporte pesado, exige adaptações significativas tanto na infraestrutura quanto na tecnologia dos veículos.

Junto ao desenvolvimento de novos veículos, também se investe na adaptação de modelos já existentes para o uso de hidrogênio, seja por meio da conversão dos motores ou pela integração de sistemas híbridos, além das questões técnicas, a criação de uma infraestrutura adequada de abastecimento e manutenção é essencial para a adoção em larga escala dessa tecnologia.

4.5.1 Estações de Abastecimento de Hidrogênio (Hydrogen Refueling Station - HRS)

A implementação de uma rede de estações de abastecimento é essencial. Essas estações devem ser capazes de armazenar e fornecer hidrogênio em alta pressão (350 ou 700 bar) para garantir tempos de reabastecimento rápidos, comparáveis aos dos veículos a diesel.

Segundo site oficial da Shell (2025), a Universidade de São Paulo (USP), em parceria com empresas como Shell e Toyota, desenvolveu uma estação que produz hidrogênio a partir do etanol diretamente nos postos, visto na Figura 71.

Figura 71 – Posto de H₂ a partir do Etanol desenvolvido pela USP com apoio da Shell



Fonte: Shell, 2025

A planta-piloto tem capacidade para produzir 100 quilos de hidrogênio por dia, volume que será utilizado para abastecer três ônibus e dois veículos leves, entre outros. O hidrogênio gerado será testado em coletivos de transporte público da USP e nos veículos Toyota Mirai e Hyundai Nexo, ambos movidos a hidrogênio, conforme relatado no site da Shell (2025).

Segundo informações divulgadas no site da Shell (2025), um investimento de R\$ 50 milhões viabilizou a implantação de uma estação na Cidade Universitária, em São Paulo, como parte de um programa de Pesquisa e Desenvolvimento que reúne diversas empresas e instituições de renome.

Dentre os participantes estão a Shell Brasil, a Raízen, a Hytron (vinculada ao Grupo Neuman & Esser), o SENAI CETIQT, a Universidade de São Paulo, por meio do Centro de Pesquisa para Inovação em Gases de Efeito Estufa, além de fabricantes do setor automotivo como Toyota, Hyundai, Marcopolo e a Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU). O objetivo principal do projeto é demonstrar a viabilidade da produção sustentável de hidrogênio a partir do etanol, aproveitando-se da infraestrutura já presente no Brasil.

4.5.2 Infraestrutura de Transporte e Armazenamento

Dependendo do método de produção e do projeto do sistema, a logística do hidrogênio inclui as seguintes etapas: compressão, injeção, armazenamento intermediário, transporte e distribuição, o hidrogênio já pode ser alimentado diretamente na rede de gás, dentro de limites especificados, conforme site da TUV Rheinland (2025).

Alternativamente, existem dutos que são utilizados apenas para hidrogênio, estes são feitos de metal ou plástico e são otimizados para o transporte de hidrogênio, o transporte de hidrogênio via dutos representa a rota mais favorável técnica, econômica e ambientalmente, pois tem menores demanda energética, perdas no transporte e impacto ambiental, se comparada a outros meios. Atualmente, existem cerca de 5 mil km de gasodutos de H₂ no mundo, uma infraestrutura ainda muito pequena, que requer trâmites com autoridades locais para ampliação.

Segundo site da Confederação Nacional da Indústria (CNI) de 2025, uma alternativa viável para viabilizar, em curto prazo, o fornecimento significativo de hidrogênio para uso energético é sua injeção em redes de gás natural, respeitando limites de concentração e pressão, no entanto, essa abordagem enfrenta desafios, especialmente relacionados à compatibilidade dos materiais das tubulações com o hidrogênio. Esse gás pode comprometer as propriedades mecânicas dos materiais, provocando trincas e danos estruturais, sobretudo nas regiões soldadas, diante disso, torna-se necessário estabelecer regulamentações específicas, realizar análises técnicas detalhadas e investir em adequações da infraestrutura existente.

Conforme relatado no site de certificação TUV Rheinland (2025), apesar de os gasodutos representarem uma das formas mais simples de transportar gases, a criação de uma infraestrutura exclusiva para o hidrogênio demanda um investimento inicial elevado. Em contrapartida, a utilização das redes de gás já instaladas reduz significativamente os custos iniciais, no entanto, é essencial que essas tubulações sejam inspecionadas com rigor para assegurar que o hidrogênio seja incorporado à mistura gasosa em proporções adequadas.

O transporte de hidrogênio pode ser realizado por diferentes meios, sendo um deles o de gasodutos apresentado acima e, além dele tem os transportes por caminhões que é uma alternativa, cada opção apresenta vantagens e limitações, dependendo da forma do hidrogênio, da distância, das perdas no processo e dos impactos ambientais envolvidos.

Já de acordo relatado no site da CNI (2025), no caso dos gasodutos, o hidrogênio é transportado em estado gasoso e representa uma solução mais econômica para percursos curtos, especialmente em distâncias de até 1,5 km, quando voltado para a distribuição local. As perdas ao longo do trajeto são relativamente baixas, variando entre 0,77% e 0,93% a cada 100 km, conforme as condições de operação da tubulação. Além disso, esse método é um dos que menos impactam o meio ambiente, com emissões que podem chegar a apenas 0,17 kg de CO₂ equivalente por quilograma de hidrogênio em distâncias de 100 km, aumentando para 0,26 kg em 400 km.

Já o transporte por caminhões permite o envio de hidrogênio tanto na forma gasosa quanto líquida, oferecendo maior flexibilidade logística, principalmente quando se trata de distribuição local em distâncias variáveis, no entanto, essa alternativa apresenta perdas mais expressivas: cerca de 1,5% do hidrogênio se perde a cada 100 km, considerando as tecnologias atuais. O consumo energético também é mais significativo, com um consumo de aproximadamente 8,75 mega joules por quilograma de hidrogênio, o que corresponde a cerca de 7,3% de seu poder calorífico inferior, de acordo com dados da CNI.

Assim, a escolha entre gasodutos e caminhões depende do equilíbrio entre custo, alcance, eficiência energética e sustentabilidade, enquanto os gasodutos se destacam por sua eficiência em curtas distâncias, porém uma certa emissão, os caminhões oferecem versatilidade, mas com maior consumo energético e menos impactos ambientais.

A produção de hidrogênio verde, obtido por eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis já destacado anteriormente e é fundamental para uma transição sustentável, isso requer investimentos em plantas de eletrólise, sistemas de armazenamento e logística de distribuição para atender à demanda dos veículos.

4.5.3 Desenvolvimento de Veículos com Células a Combustível

Veículos movidos a hidrogênio utilizam células a combustível para converter o hidrogênio em eletricidade conforme apresentado anteriormente, que alimenta motores elétricos, sendo necessário o desenvolvimento de sistemas específicos de armazenamento de hidrogênio, células a combustível eficientes e motores elétricos adaptados.

Atualmente, os caminhões movidos a hidrogênio representam uma das principais apostas para descarbonizar o transporte pesado, combinando alta autonomia, recarga rápida e zero emissões diretas, duas iniciativas de destaque nesse setor são lideradas pela Hyundai Motor Company e pela Anglo American.

A Hyundai desenvolveu o XCIENT Fuel Cell, visto na Figura 72, o primeiro caminhão pesado com célula de combustível de hidrogênio produzido em série no mundo. O modelo possui autonomia superior a 400 km por abastecimento e já

percorreu mais de 7 milhões de quilômetros em operações reais na Suíça, sem registros de falhas críticas.

Seu sistema combina dois stacks de células de combustível de 90 kW, totalizando 180 kW de potência, além de um motor elétrico de 350 kW e tanques que armazenam até 31 kg de hidrogênio a 350 bar, conforme relatado pela própria montadora.

Figura 72 – Caminhão Hyundai XCIENT Fuel Cell movido a H₂



Fonte: Hyundai, 2025

Nos Estados Unidos, a Hyundai está incorporando os caminhões XCIENT Fuel Cell na logística de sua nova fábrica, a *Hyundai Motor Group Metaplant America* (HMGMA), como parte de sua estratégia para reduzir emissões e promover práticas sustentáveis.

Segundo o site da ENGIE (2022), em parceria com a Anglo American e a First Mode, a Anglo American desenvolveu o maior caminhão de mineração movido a hidrogênio do mundo, com capacidade de carga de 290 toneladas. O protótipo foi apresentado em 2022 na mina de platina Mogalakwena, na África do Sul. O veículo utiliza uma célula de combustível híbrida de hidrogênio, responsável por cerca de metade da energia necessária, enquanto a outra metade é fornecida por uma bateria que permite a recuperação de energia durante a frenagem. Essa iniciativa faz parte da estratégia FutureSmart Mining da Anglo American, que visa tornar suas operações neutras em carbono até 2040.

4.5.4 Tanques de Armazenamento de Hidrogênio

Os tanques de hidrogênio comprimido são amplamente utilizados, especialmente em veículos movidos a célula de combustível. Eles são classificados em diferentes tipos, conforme os materiais e pressões suportadas:

Tipo I: Construídos inteiramente de metal (aço ou alumínio), suportam pressões de até 200 bar.

Tipo II: Possuem um revestimento metálico com reforço de fibra (vidro, aramida ou carbono), permitindo pressões de até 300 bar.

Tipo III: Compostos por um revestimento metálico envolto em fibra de carbono, alcançam pressões de até 700 bar.

Tipo IV: Totalmente em compósito, com revestimento interno de polímero e reforço externo de fibra de carbono, também suportam até 700 bar.

Conforme site da montadora Toyota, O Mirai é um exemplo de utilização de tanque com gás comprimido, ele utiliza tanques do Tipo IV com três camadas de fibra de carbono reforçada, armazenando hidrogênio a 700 bar para fornecer uma autonomia de aproximadamente 600 km.

Já o hidrogênio líquido é armazenado a temperaturas criogênicas (-253°C) em tanques altamente isolados, essa forma de armazenamento é utilizada em aplicações que requerem alta densidade energética, como no transporte marítimo e em veículos experimentais.

A Toyota também desenvolveu um sistema de hidrogênio líquido com um auto pressurizador que reutiliza o gás evaporado para aumentar a pressão interna, melhorando a eficiência do sistema, demonstrada no veículo conceito GR Corolla, conforme relatado em uma publicação no The Verge (2024).

No setor marítimo, o ferry MF Hydra, operado pela empresa norueguesa Norled, é o primeiro navio movido a hidrogênio líquido, com capacidade para 300 passageiros e 80 veículos, utiliza tanques criogênicos de 80 m³ para armazenar o combustível, segundo publicação no próprio site da empresa norueguesa.

Para aplicações estacionárias, como armazenamento em larga escala e fornecimento para redes de distribuição, são utilizados tanques criogênicos de grande capacidade. Em seu site, a Energy Vault (2025) apresenta o projeto Calistoga Resiliency Center, na Califórnia, que emprega um tanque criogênico de 80.000 galões para abastecer células a combustível que fornecem energia à cidade em caso de falhas na rede elétrica.

A transição para veículos movidos a hidrogênio representa um passo significativo rumo à descarbonização do setor de transporte, embora os custos iniciais e as adaptações necessárias sejam consideráveis, os benefícios ambientais e a redução da dependência de combustíveis fósseis justificam os investimentos, com o avanço da tecnologia e o apoio de políticas públicas, espera-se que o hidrogênio desempenhe um papel central na mobilidade sustentável do futuro.

5 SUSTENTABILIDADE VEICULAR SEGMENTO AGRÍCOLA

Nas últimas décadas, o setor agrícola tem passado por uma transformação significativa, impulsionada pela crescente demanda global por alimentos, pela volatilidade nos preços dos insumos e pela necessidade de aumentar a produtividade em áreas cada vez mais limitadas. Essa combinação desafiadora tem forçado produtores e indústrias a repensarem seus modelos produtivos, estimulando a mecanização intensiva e a incorporação de tecnologias voltadas à eficiência operacional e à sustentabilidade ambiental.

Nesse contexto, os tratores desempenham papel central na modernização do campo, constituindo-se como máquinas essenciais em diversas etapas da produção agrícola. Tradicionalmente movidos a diesel, esses veículos combinam motores de elevada potência e sistemas de transmissão robustos, capazes de executar atividades que vão desde o preparo intensivo do solo até o acionamento de implementos altamente especializados. No entanto, essa mesma dependência de combustíveis fósseis impõe desafios consideráveis, como o alto custo operacional, a manutenção constante e, sobretudo, as emissões atmosféricas significativas que pressionam metas ambientais cada vez mais restritivas.

De acordo com Mocera et al. (2023), a mecanização agrícola é responsável por aproximadamente 30% das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) associadas à atividade agrícola. Essa contribuição tende a se intensificar diante da crescente demanda por alimentos decorrente do aumento populacional. A necessidade de máquinas mais robustas para suportar as exigências do campo, aliada ao elevado consumo de combustível, torna os equipamentos agrícolas protagonistas no debate sobre as emissões de gases de efeito estufa.

Frente a esse cenário, novas soluções de propulsão vêm sendo pesquisadas e implementadas com o objetivo de mitigar os impactos ambientais sem comprometer o desempenho operacional. Entre essas alternativas, destacam-se os tratores elétricos, híbridos e movidos a biocombustíveis avançados. Segundo Boehm (2023), embora nenhuma tecnologia isolada consiga simultaneamente aumentar a produtividade e reduzir as emissões em todos os tipos de sistemas agrícolas, considerando a grande diversidade de culturas, práticas e condições socioeconômicas e ambientais. No

entanto, as inovações tecnológicas vêm contribuindo significativamente para o desenvolvimento de soluções mais sustentáveis. Para que essas inovações se tornem efetivas, é necessário um investimento significativo em pesquisa, desenvolvimento e adaptação às diferentes realidades produtivas.

Diante da complexidade envolvida na transição energética no campo, diversos caminhos têm sido explorados. Entre elas, destacam-se a melhoria da eficiência dos motores, o uso de sistemas hidráulicos e transmissões mais inteligentes, a automação por meio de tecnologias de condução autônoma e a integração de recursos digitais são estratégias promissoras para a diminuir o consumo energético e das perdas operacionais. No campo energético, destaca-se a relevância de combustíveis alternativos de menor impacto ambiental, como o biometano, biodiesel e combustíveis sintéticos, além da eletrificação parcial ou total das máquinas, com uso de baterias ou células a combustível.

Em paralelo, os fabricantes têm enfrentado rigorosas regulamentações ambientais que impõem limites específicos à emissão de poluentes provenientes dos motores a combustão. Em resposta, foram implementadas estratégias de pós-tratamento dos gases de escape, como filtros de partículas, catalisadores e sistemas de recirculação de gases. Apesar de eficazes na redução das emissões, essas soluções ainda geram subprodutos e não eliminam totalmente os impactos ambientais, o que reforça a urgência por alternativas mais limpas e eficientes.

Portanto, o futuro da mecanização agrícola está intrinsecamente ligado à adoção de tecnologias sustentáveis de propulsão. Tratores equipados com sistemas híbrido-elétricos, propulsão totalmente elétrica ou alimentados por biocombustíveis avançados representam uma resposta concreta à necessidade de conciliar produtividade e preservação ambiental. Tais tecnologias não apenas reduzem a pegada de carbono, como também proporcionam ganhos em eficiência energética, manutenção e custos operacionais. A transição para essas soluções exige uma abordagem sistêmica, integrando inovação tecnológica, políticas públicas e incentivo à adoção nas mais diversas realidades do setor agrícola.

5.1 Tratores agrícolas: Funções básicas

Conforme Builchi (2016), a agricultura atual apresenta uma crescente dependência de máquinas e implementos agrícolas. Como consequência, observa-se uma diminuição da demanda por mão de obra humana, bem como a escassez de trabalhadores qualificados para operar equipamentos cada vez mais sofisticados tecnologicamente.

A mecanização agrícola trouxe ganhos expressivos, como o aumento da produtividade e da eficiência nas atividades rurais, além de reduzir significativamente o esforço físico exigido dos trabalhadores. Nesse contexto, o trator se destaca como peça central nesse processo de transformação. Entre suas principais funções está a tração de implementos e equipamentos agrícolas, como arados, grades, semeadoras e adubadoras.

Além disso, os tratores também são utilizados para acionar máquinas estacionárias, como bombas para irrigação, trituradores de grãos e picadores de forragens. Uma característica relevante dessa máquina é sua capacidade de movimentar-se ao mesmo tempo em que aciona equipamentos por meio da Tomada de Potência (TDP), o que permite operar colhedoras, pulverizadores e outros implementos de forma simultânea.

Nesse contexto, o trator tem se consolidado como um agente transformador nas práticas agrícolas no Brasil e no mundo, contribuindo de forma expressiva para a substituição da tração animal e o trabalho manual por soluções mecanizadas.

Conforme aponta Padovan (2018), o trator agrícola é uma máquina autopropelida que atua como fonte de energia para o funcionamento de diversos implementos e máquinas acoplados a ele, sendo essencial para a realização de múltiplas tarefas no campo.

O trator agrícola é uma máquina autopropelida que atua como fonte primária de potência, sendo capaz de acionar uma ampla variedade de implementos e equipamentos acoplados, possibilitando a execução de diversas atividades no campo.

O motor tem como objetivo converter a energia proveniente do combustível em energia mecânica, expressa em forma de rotação. A embreagem, acionada por pedal,

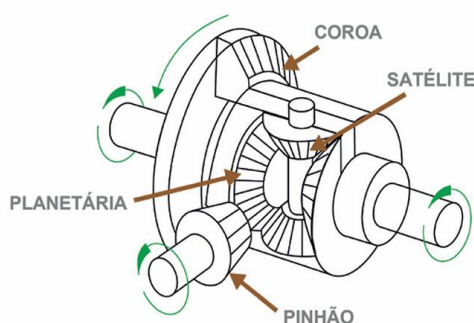
é responsável por conectar ou desconectar o motor do sistema de transmissão, permitindo o controle da transferência de potência. Já a caixa de marchas, operada por uma alavanca, permite a conversão e a transmissão do torque e rotação do motor para as rodas, possibilitando diferentes velocidades de deslocamento do trator. (PADOVAN, 2018).

Yamashita (2010) explica que os tratores geralmente possuem uma alavanca manual de aceleração, que permite manter constante a rotação ideal do motor. Essa prática possibilita o uso de marchas mais rápidas e, conseqüentemente, maior velocidade de deslocamento durante as operações.

Conforme Bulchi (2016), devido à posição longitudinal do motor em relação ao sentido de deslocamento do trator, a força rotacional gerada precisa ser redirecionada em 90 graus para acionar o sistema de tração. Essa conversão é realizada pelo diferencial, componente fundamental para o movimento do trator tanto para frente quanto para trás.

O diferencial, formado por componentes como o pinhão, a coroa e as engrenagens planetárias, conforme ilustrado na Figura 73, tem a função de redirecionar a força gerada pelo motor. Além disso, permite que as rodas traseiras ou dianteiras girem em velocidades diferentes, o que é essencial em curvas ou em terrenos irregulares.

Figura 73 – Componentes do diferencial



Fonte: Senar (2017)

De acordo com Padovan (2018), os tratores agrícolas são equipados com sistemas de bloqueio do diferencial, cuja função é eliminar o comportamento padrão

do diferencial, igualando a velocidade de rotação das rodas quando uma delas perde tração com o solo e começa a deslizar. Isso acontece porque, devido ao funcionamento do diferencial, o movimento se distribui de forma independente entre as rodas e tende a direcionar mais força para aquela com menor resistência ao solo, resultando em patinagem enquanto a outra roda permanece imóvel. O bloqueio do diferencial evita essa situação, assegurando melhor aderência. A forma de acionamento do sistema varia entre fabricantes e modelos de tratores, e sua utilização deve ser feita apenas com o trator em deslocamento em linha reta, para evitar danos mecânicos.

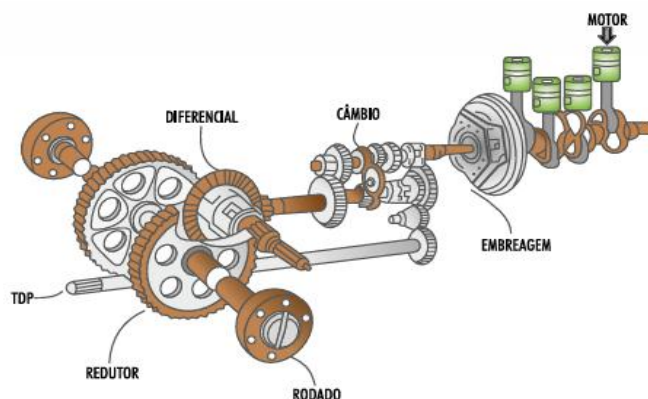
Outros componentes são os redutores finais, segundo a apostila do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural – Senar (2017), são conjuntos de engrenagens localizados nos eixos traseiros ou, em alguns casos, na tração dianteira do trator, sendo responsável por transmitir a rotação proveniente do diferencial até as rodas, promovendo a redução da velocidade angular, o aumento do torque e a atenuação dos impactos absorvidos durante o deslocamento.

De acordo com Builchi (2016), os rodados desempenham papel essencial na estrutura e desempenho do trator, sendo responsáveis pela sustentação do equipamento, sua mobilidade, estabilidade e capacidade de direcionamento. Além disso, são fundamentais na transmissão da força gerada pelo motor ao solo, assegurando a tração e a aderência necessárias para a execução eficiente das operações agrícolas.

Complementando essa visão, o tipo, o tamanho e a calibragem dos rodados influenciam diretamente no consumo de combustível, na compactação do solo e na eficiência operacional do trator. Rodados inadequados ou mal ajustados podem comprometer o desempenho em diferentes tipos de terreno, dificultando manobras e reduzindo a produtividade das atividades no campo. Por isso, a escolha correta dos rodados deve considerar não apenas as características do trator, mas também o tipo de cultura, o relevo da área e as condições do solo, visando garantir maior rendimento e menor desgaste dos componentes mecânicos.

A Figura 74 apresenta uma representação esquemática da estrutura básica de um trator, destacando seus principais sistemas e componentes.

Figura 74 – Esquema da estrutura básica de um trator



Fonte: Senar (2017)

5.1.1 Sistemas Hidráulicos

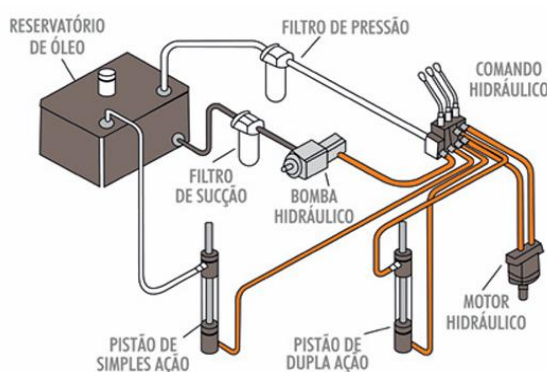
Segundo a publicação da Revista do Senar (2017), o sistema hidráulico é uma das formas pelas quais se aproveita a energia produzida pelo motor, utilizando um fluido sob pressão — geralmente óleo — para transmitir força. Em tratores agrícolas, esse sistema é essencial para o funcionamento de implementos e, normalmente, é dividido em dois tipos principais: o sistema de engate de três pontos e o sistema de controle remoto.

Atualmente, a maior parte dos tratores utiliza um compartimento único, compartilhado com o sistema de transmissão, como reservatório do fluido hidráulico. Com isso, o mesmo óleo que realiza a lubrificação da transmissão também é utilizado para alimentar o sistema hidráulico de três pontos, os controles hidráulicos remotos e outros subsistemas, como a direção hidráulica, a TDP, a Tração Dianteira Auxiliar (TDA) e o bloqueio do diferencial.

Um sistema hidráulico é composto dos seguintes componentes, ilustrado na Figura 75:

- Reservatório de óleo que tem a função de armazenar o fluido hidráulico utilizado no sistema.
- Filtro de sucção e de pressão tem a função de proteger e impedir a entrada de partículas e impurezas no sistema.
- Bomba de óleo hidráulica tem a função de converter energia mecânica oriunda do motor em energia hidráulica. Enquanto a velocidade de atuação dos atuadores é responsabilidade da vazão hidráulica, a pressão é responsável pela força.
- Comando hidráulico – alavancas;
- Atuadores – cilindro ou motor hidráulico tem função de transformar a energia hidráulica em movimento mecânico. Os atuadores geram movimento linear, que são os pistões, enquanto os motores hidráulicos produzem movimento rotativo, sendo utilizados em diferentes implementos.
- Tubulações tem função de conduzir o óleo hidráulico no sistema para os diversos componentes.

Figura 75 – Demonstração Sistema hidráulico tratores



Fonte: Senar (2017)

O sistema hidráulico de três pontos (SHTP) é baseado na utilização de fluido sob pressão para transmitir força, permitindo que o trator eleve, desloque e acione diversos implementos agrícolas. Esse sistema é fundamental para a integração entre o trator e os equipamentos, sendo decisivo para o desempenho e eficiência das operações no campo (Builchi, 2016).

Conforme publicado pela Revista do Senar (2017), o SHTP possibilita o uso de implementos do tipo montado ou semi montado, sendo um elo essencial na interação mecânica. A força de elevação do sistema depende do modelo e fabricante do trator, devendo sempre ser verificada no manual do operador.

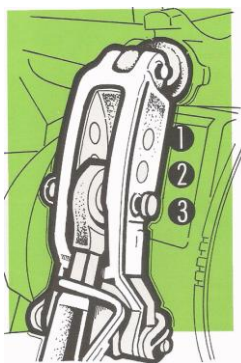
As alavancas de controle do sistema são instaladas em um painel com marcações específicas cada posição corresponde a um nível de profundidade ou altura do implemento. Um batente limitador, fixado nesse painel, permite que a alavanca retorne à configuração anterior após a realização de curvas ou manobras, além de possibilitar o ajuste da altura máxima de elevação.

Em modelos de tratores que dispõem de comandos hidráulicos auxiliares, é possível utilizar o sistema para acionar diretamente máquinas e implementos. Para isso, basta conectar as mangueiras de alta pressão do equipamento agrícola nas saídas hidráulicas do trator e operar os comandos internos, permitindo que o operador controle as funções sem sair da cabine (Builchi, 2016).

Ainda segundo a Revista do Senar (2017), a Figura 76 ilustra o chamado suporte do terceiro ponto também conhecido como viga de controle permite ajustar a sensibilidade do sistema hidráulico. Essa estrutura é fixa em uma extremidade e móvel na outra.

A posição de acoplamento do terceiro ponto influencia diretamente a sensibilidade: quanto mais próximo da extremidade móvel, menor será a força necessária para acionar o sistema, já que a válvula de controle responde mais rapidamente a variações de pressão.

Figura 76 – Viga de controle



Fonte: Casimiro (2015)

A seleção do furo para o engate do terceiro ponto na viga de controle, ilustrado na Figura 77, deve considerar variáveis como o tipo de solo, seu nível de umidade e a profundidade de trabalho exigida pelo implemento. Em condições de solo mais leve ou úmido, o uso de furos próximos ao sensor proporciona maior sensibilidade ao sistema hidráulico, permitindo ajustes mais precisos diante de menores resistências.

Por outro lado, em situações em que o terreno é mais compacto ou o trabalho exige maior profundidade, é recomendável posicionar o engate de forma a reduzir a sensibilidade, evitando que o sistema hidráulico interfira negativamente na penetração do implemento.

Vale destacar que a localização do sensor na viga de controle pode variar conforme o modelo do trator, sendo encontrado tanto na parte superior quanto inferior dessa estrutura, o que influencia o ajuste do sistema conforme a configuração do equipamento.

Essa variação influencia a forma como o sistema responde às forças exercidas pelo implemento durante a operação. (SENAR, 2017)

Figura 77 -- Implemento acoplado na TDP e sistema de três pontos



Fonte: Revista Cultivar (2020)

Segundo Builchi (2016), outro componente é a tomada de potência (TDP), representada na Figura 78. Esse dispositivo tem a função de converter o movimento rotativo gerado pelo motor e transmiti-lo por meio de um conjunto de engrenagens até sua extremidade, situada na parte traseira do trator.

Nesse ponto, é possível acoplar diversos implementos e máquinas com mecanismos rotativos, como roçadeiras, pulverizadores, distribuidores de sementes e fertilizantes, enxadas rotativas, entre outros. As rotações padronizadas para operação da TDP são de 540 e/ou 1000 RPM, conforme estabelecido pela norma técnica ABNT-PB-83.

Figura 78 – Tomada de Potência



Fonte: Senar (2017)

5.1.2 Classificação dos Tratores

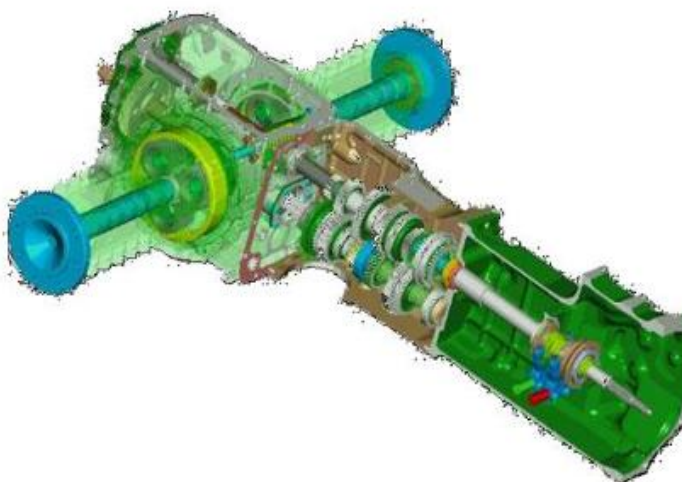
De acordo com Builchi (2016), a classificação dos tratores pode ser realizada com base em dois critérios fundamentais: o tipo de rodado e o tipo de chassi, o chassi corresponde à estrutura principal do trator, formada pela integração de seus componentes, e deve apresentar resistência suficiente para suportar os esforços de torção provocados pelas operações de tração. Os tratores agrícolas podem ser construídos com quatro tipos de estruturas de chassis.

O chassi monobloco é uma das estruturas mais utilizadas, especialmente em modelos com potência inferior a 100 CV. Nessa configuração, a própria carcaça de componentes como o motor, a transmissão, o diferencial e as reduções finais compõem a estrutura de sustentação, absorvendo diretamente os esforços mecânicos gerados durante a tração.

Entre as vantagens do chassi monobloco destacam-se a simplicidade construtiva e a considerável redução dos custos de produção. No entanto, uma das

limitações desse tipo de estrutura é a necessidade de motores mais reforçados, o que pode ocasionar níveis mais elevados de vibração na estação de trabalho do operador. A Figura 79 apresenta uma representação esquemática do chassi monobloco.

Figura 79 – Estrutura de Chassi Monobloco



Fonte: Padovan (2018)

Segundo Builchi (2016), o chassi conhecido como chassi convencional é constituído por perfis longitudinais de aço, reforçados por elementos transversais, sendo geralmente adotado em tratores com potência superior a 100 CV, esse tipo de estrutura foi desenvolvido para evitar que a transmissão e o motor do trator sejam submetidos a esforços de torção gerados pela tração.

Além disso, permite a instalação do motor sobre coxins de borracha, o que reduz a transmissão de vibrações ao restante da estrutura, facilita o acoplamento de implementos frontais, a colocação de pesos adicionais na parte dianteira e contribui para o aumento da capacidade de carga do trator, como principal desvantagem, destaca-se o custo elevado de fabricação.

A Figura 80 apresenta o modelo estrutural desse tipo de chassi mais facilmente encontrado.

Figura 80 – Estrutura de Chassi Convencional



Fonte: Padovan (2018)

Ainda segundo Builchi (2016), o chassi articulado é utilizado principalmente em tratores de grande porte com tração nas quatro rodas (4x4), sendo desenvolvido para melhorar a transferência de potência do trator para o solo, essa configuração permite o uso de pneus de maior diâmetro no eixo dianteiro, ampliando a área de contato com o solo e, conseqüentemente, a eficiência de tração. No entanto, o sistema articulado apresenta algumas limitações, como menor flexibilidade, maior dificuldade de manobra e menor adaptabilidade ao acoplamento de implementos diversos. A estrutura do chassi articulado está representada na Figura 81.

Figura 81 – Estrutura do Chassi Articulado



Fonte: Padovan (2018)

Segundo a revista Senar (2017) a classificação dos tratores quanto ao tipo de rodado considera dois principais grupos: tratores de quatro rodas e tratores de esteiras. Os tratores de quatro rodas são os mais comuns e podem ser classificados conforme o sistema de tração.

O modelo 4x2 possui tração apenas nas rodas traseiras, o que torna o equipamento mais leve e fácil de manobrar, mas menos eficiente em solos escorregadios. Já o trator 4x2 com TDA inclui tração nas rodas frontais quando necessário, proporcionando melhor desempenho em terrenos com baixa aderência. Por fim, o trator 4x4, com tração integral em todas as rodas, é indicado para áreas extensas e trabalhos mais exigentes, sendo reconhecido pela sua potência e estabilidade, apesar de sua menor agilidade em espaços reduzidos.

Os tratores de esteiras podem ter esteiras de ferro ou borracha e são equipados com TDP, SHTP e outros recursos específicos para o trabalho agrícola. A principal vantagem desse modelo é a ampla área de contato com o solo, o que reduz sua compactação e melhora a estabilidade, especialmente em terrenos inclinados, devido ao seu baixo centro de gravidade.

5.2 Aplicação Tratores Elétricos

Segundo Mocera et al. (2023) Um trator é caracterizado, principalmente, por duas funções fundamentais: o fornecimento de potência de tração às rodas e a geração de potência para os implementos acoplados, por meio de uma ou mais interfaces mecânicas disponíveis, visando a redução de emissões por vias não convencionais, o aumento da eficiência do conjunto trator/implemento surge como a abordagem mais viável, isto é, realizar as mesmas atividades com menor consumo de combustível.

Nesse contexto, os modernos sistemas elétricos, compostos por motores elétricos, eletrônica de potência e baterias, oferecem uma gama mais ampla de possibilidades para geração e fornecimento de energia em tratores. Pesquisadores e fabricantes do setor agrícola estão investigando novas soluções para tornar os tratores mais eficientes na execução de tarefas diárias. Nesse cenário, destaca-se a eletrificação do sistema de propulsão como uma das alternativas mais promissoras,

em razão dos diversos benefícios que pode proporcionar como; aumento da eficiência na transmissão de potência do motor principal para cada interface mecânica; maior flexibilidade no ponto de operação do motor de combustão interna (ICE), permitindo otimizações conforme a tarefa executada; controle mais preciso da entrega de potência, graças a conversores eletrônicos avançados; capacidade de fornecer energia aos implementos por meio de linhas elétricas de alta tensão (≥ 48 V).

Nesse contexto de modernização e sustentabilidade, a eletromobilidade na agricultura representa um avanço estratégico. De acordo com Pickel (2019), a produção e consumo de energia renovável em áreas rurais têm potencial para se tornar um dos pilares da valorização das atividades agrícolas e florestais. O meio rural, por contar com grandes extensões de terra, pode ser um vetor para o desenvolvimento de fontes energéticas limpas, seja por meio de cultivos voltados à produção de energia, seja pela instalação de painéis solares ou turbinas eólicas, ilustrado na Figura 82. Com isso, as propriedades rurais passam a ter papel de protagonismo na produção energética, em especial na forma elétrica.

Figura 82 – Fontes Energéticas Limpas



Fonte: Pickel (2019)

Ao mesmo tempo, a agricultura é altamente dependente de energia, especialmente de fontes fósseis, com o aumento dos custos desses insumos, produtores e pequenas empresas tendem a buscar alternativas independentes e

locais. A produção descentralizada de energia nas fazendas, com posterior uso nos próprios equipamentos, não apenas aumenta a eficiência como também reduz a pressão sobre as redes de distribuição. Essa dinâmica fortalece não só o setor rural, mas também contribui indiretamente para a segurança energética urbana e para a bioeconomia.

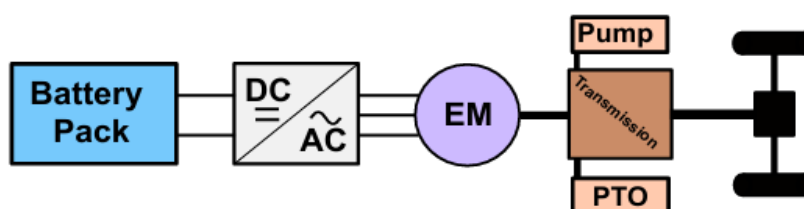
5.2.1 Tratores Totalmente Elétricos

Novamente seguindo as ideias de Mocera et al. (2023), a configuração totalmente elétrica é, sem dúvida, a alternativa mais simples no processo de eletrificação de tratores. Nesse tipo de sistema, toda a energia necessária para a operação é fornecida exclusivamente por meio de baterias, sem a utilização de ICE. Essa arquitetura é caracterizada pela presença de apenas uma fonte primária de energia o sistema de armazenamento baseado em baterias (BESS), que deve ser cuidadosamente projetado para oferecer o melhor equilíbrio entre integração ao veículo e a demanda energética do ciclo de trabalho.

Como ilustrado na Figura 83, essa configuração pode incluir uma ou várias máquinas elétricas responsáveis por fornecer potência mecânica às diversas interfaces do trator, como a tomada de potência, sistemas hidráulicos e conexões elétricas (plugues).

Os conversores eletrônicos de energia exercem uma função essencial na transformação de CC em corrente alternada (CA), com o objetivo de suprir cada fase da máquina elétrica utilizando a estratégia de acionamento apropriada para regular o torque ou a rotação.

Figura 83 – Arquitetura de Trator Totalmente Elétrico



Fonte: Mocera et al. (2023)

Segundo Mocera et al. (2023) dado o atual cenário tecnológico, os Tratores Totalmente Elétricos (FETs) surgem como a melhor opção do ponto de vista da integração veicular, permitindo também uma transição mais simples a partir das arquiteturas tradicionais. Essa configuração tem a vantagem de eliminar as emissões locais e pode oferecer melhorias significativas na eficiência energética do veículo, especialmente quando há sistemas eficazes de armazenamento de energia elétrica a bordo.

No entanto, a eletrificação total de tratores agrícolas ainda enfrenta desafios importantes que dificultam sua ampla adoção. Um dos principais obstáculos é a baixa densidade energética volumétrica das baterias em comparação com o diesel. Enquanto pacotes de íons de lítio possuem densidade em torno de 350 Wh/L, o diesel alcança cerca de 11 kWh/L.

Isso implica na necessidade de volumes muito maiores de baterias para atender às exigências energéticas de um ciclo completo de trabalho. Além disso, o peso elevado do sistema de armazenamento) pode comprometer o desempenho no campo, principalmente no que se refere à compactação do solo, tornando essencial considerar esse fator no projeto do sistema de propulsão.

Outro entrave crítico é a infraestrutura de recarga, a ausência de pontos de carregamento em áreas rurais realidade que deve persistir nos próximos anos limita a viabilidade operacional dos FETs, embora seja possível planejar recargas ao longo do dia de trabalho, hoje a alternativa mais realista envolve a instalação de estações de recarga nas próprias propriedades rurais.

Isso, contudo, impõe duas restrições: a necessidade de o trator retornar constantemente à base, reduzindo a eficiência operacional, e a limitação de potência dos carregadores, que geralmente não ultrapassam 22 kW, restringindo o uso de tecnologias de recarga rápida. Apesar disso, a presença crescente de sistemas fotovoltaicos nas fazendas, somada ao seu baixo custo, pode compensar parcialmente essas limitações e tornar o sistema mais atrativo para os produtores.

A escolha por uma configuração totalmente elétrica também deve considerar a demanda energética do ciclo de trabalho e o nível de integração dos sistemas embarcados. De acordo com Mocera et al. (2023), embora maiores níveis de eletrificação tendam a trazer ganhos de eficiência, optar por um sistema totalmente

elétrico nem sempre é a melhor decisão. É fundamental analisar o cenário operacional específico em que o trator será utilizado, adaptando o projeto do trem de força às condições reais de trabalho para garantir a melhor relação entre produtividade, autonomia e custo.

Com o objetivo de contornar essas limitações, esforços têm sido direcionados ao desenvolvimento e aprimoramento de sistemas híbridos de armazenamento de energia, que combinam baterias com supercapacitores. Essa solução busca aumentar a capacidade de fornecimento de potência de pico e melhorar a resposta dinâmica do sistema, reduzindo a necessidade de pacotes de baterias excessivamente grandes e pesados. Tais estratégias têm potencial para tornar os tratores eletrificados mais competitivos frente às soluções tradicionais, equilibrando sustentabilidade, desempenho e viabilidade técnica.

Segundo Mocera et al. (2023), a eletrificação pode desempenhar um papel importante na resolução dos pontos mencionados anteriormente. A adoção de motores elétricos e de uma fonte adicional de armazenamento de energia pode auxiliar o motor a operar em zonas de maior eficiência, além de possibilitar a geração de energia elétrica embarcada para alimentar implementos eletrificados. Os sistemas elétricos permitem um controle mais preciso e eficiente dos atuadores em comparação com os sistemas hidráulicos convencionais.

5.2.2 Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery (SESAM)

Segundo Peter Pickel (2019). Durante a apresentação na feira SIMA (*Salon International du Machinisme Agricole*), foi exibido o conceito do *trator Sustainable Energy Supply for Agricultural Machinery* (SESAM).

A busca por alternativas energéticas no setor agrícola tem impulsionado o desenvolvimento de novas propostas voltadas à eletrificação de veículos de grande porte. Uma dessas iniciativas foi exibida em um dos principais eventos internacionais da área, chamando atenção pelo foco em eficiência e redução de emissões no uso de tratores.

Ilustrado na Figura 84, desenvolvido pela John Deere como o primeiro protótipo totalmente funcional de trator agrícola movido exclusivamente a baterias.

Figura 84 – Trator SESAM

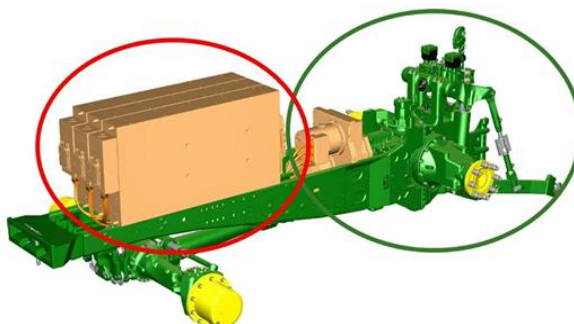


Fonte: Mondo Macchina (2017)

Esse modelo demonstrou a integração de dois motores elétricos em um chassi convencional, com foco na compactação do sistema de propulsão elétrica, ilustrado na Figura 85.

De acordo com Pickel (2019), uma das máquinas elétricas é dedicada à tração, enquanto a outra é responsável pelo acionamento da tomada de potência (TDP) e dos sistemas auxiliares, mantendo todas as funcionalidades operacionais de um trator convencional, como o sistema hidrostático, a TDP e o engate de três pontos.

Figura 85 – Estrutura do Chassi Elétrico



Fonte: PICKEL (2019)

A arquitetura elétrica do SESAM foi projetada para se integrar à transmissão tradicional, conectando-se diretamente ao eixo traseiro, essa solução permite preservar a estrutura típica dos tratores agrícolas, enquanto obtêm vantagens significativas em eficiência energética e densidade de potência. A versão demonstrada sem bateria, por exemplo, foi capaz de fornecer até 400 cavalos de potência de forma contínua, destacando o potencial da eletrificação não apenas como alternativa ao motor a combustão, mas também como uma solução capaz de elevar o desempenho e da flexibilidade operacional no campo.

Entretanto, a versão equipada com bateria de íons de lítio, com capacidade de 130 kWh, apresentou limitações operacionais significativas, sob carga máxima, o tempo de funcionamento é inferior a uma hora, dado que a potência nominal do sistema gira em torno de 130 kW, considerando uma taxa de descarga de 1 Coulomb.

Essa restrição evidencia um dos principais desafios enfrentados pela eletrificação de tratores de grande porte: a necessidade de baterias muito volumosas e pesadas para garantir longos períodos de operação. Por exemplo, um trator de 290 kW trabalhando por 12 horas a 50% de carga exigiria uma bateria com cerca de 12 toneladas e 5 m³ de volume. Em contrapartida, para tratores menores, a viabilidade técnica é mais promissora um modelo de 50 kW poderia operar por aproximadamente quatro horas com uma bateria de 600 kg e 100 kWh de capacidade. Ainda assim, é necessário considerar que o tempo efetivo de uso é cerca de 20% inferior ao estimado, devido à impossibilidade de descarga completa e à degradação progressiva da capacidade da bateria ao longo do tempo.

Essas observações reforçam que, embora os avanços na eletrificação tragam benefícios ambientais e operacionais, ainda há obstáculos técnicos relevantes, principalmente no que diz respeito à autonomia energética. A compactação e a integração inteligente dos componentes elétricos, no entanto, indicam um caminho promissor para aumentar a sustentabilidade e a produtividade das operações agrícolas.

5.2.3 T4 Eletric Power

De acordo com a ficha técnica disponível no site da New Holland, empresa pertencente ao grupo CNH Industrial, o trator T4 Electric Power, ilustrado na Figura 86, foi projetado com um motor elétrico de alta eficiência e desempenho, capaz de fornecer 65 CV (48 kW) de potência na tomada de potência (TDP) e 74 CV (55 kW) de potência nominal.

Figura 86 – Trator T4 Electric Power



Fonte: Revista Cultivar (2025)

Segundo o site da revista Cultivar, o sistema de bateria desse modelo possui uma capacidade máxima de armazenamento de energia de 110 kWh, operando com um circuito de alta tensão de 400 V. A bateria totalmente integrada permite que o trator utilize a energia de forma otimizada, garantindo maior tempo de operação e entrega de torque contínuo em baixas rotações, reduzindo significativamente a necessidade de trocas de marcha. Além disso, o T4 Electric Power se destaca pela aceleração eficiente e resposta rápida, proporcionando uma experiência de operação aprimorada e maior facilidade de manobra.

Em comparação com os modelos equivalentes a diesel, o T4 Electric Power entrega um desempenho superior, conforme informado pela fabricante. O modelo conta com tração nas quatro rodas, uma transmissão 12x12 já consolidada no

mercado, inversor de potência eletrônico sem necessidade de embreagem e mantém todas as funcionalidades essenciais de um trator utilitário convencional a diesel. Entre elas estão: tomada de força eletro-hidráulica traseira, barra de tração, múltiplos comandos remotos traseiros, válvulas montadas na parte central e um carregador frontal mecânico autonivelante 725LU, robusto e completo, com terceira função e concha de 84 polegadas inclusa.

Graças ao controle aprimorado, maior precisão e alta capacidade de resposta, o equipamento aumenta a produtividade no campo ao reduzir os ciclos de operação, sua transmissão eletrificada proporciona funcionamento silencioso, com torque elevado e resposta rápida, mesmo em baixas rotações.

As características próprias dos dois motores elétricos, integradas à transmissão eletrônica *Power Shuttle* 12x12, tornam possível que operadores com pouca experiência utilizem os implementos com facilidade, sem a exigência de trocas de marcha exatas ou controle preciso da aceleração, já os operadores mais experientes podem ajustar continuamente a velocidade apenas com o controle das rotações do motor, a entrega progressiva de potência em baixas velocidades e a constância em altas velocidades resultam em maior controle e precisão durante os trabalhos agrícolas.

Segundo a empresa, considerando tarefas de intensidade leve, moderada e pesada no dia a dia, estima-se que o trator possa alcançar uma autonomia média de até 4 horas. No entanto, esse tempo pode se estender para até 8 horas em atividades de menor exigência energética, esse tempo de operação prolongado permite aos usuários realizarem diversos tipos de serviços sem necessidade de recargas frequentes, o que contribui para o aumento da eficiência operacional e a diminuição de períodos de inatividade.

O trator pode ser recarregado por diferentes fontes de energia, como redes elétricas convencionais, sistemas solares fotovoltaicos, biodigestores e turbinas eólicas, tanto em CA quanto em CC. Quando operando em corrente contínua com carregadores rápidos disponíveis no mercado, o tempo de recarga total é de apenas uma hora.

Adicionalmente, o T4 Electric Power disponibiliza energia sempre que necessário por meio da funcionalidade prática e versátil chamada *Exportable Power*,

com tomadas de 110V e 220V, compatíveis com aquelas utilizadas em oficinas e instalações rurais, o trator pode ser utilizado como fonte de alimentação para equipamentos elétricos, como soldadores, furadeiras e serras.

5.2.4 Fendt e107 V Vario

De acordo com a documentação técnica disponível no site da Fendt, a empresa, que faz parte do grupo AGCO Corporation, tem investido fortemente em inovação diante da crescente demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis e silenciosas. Como resultado desses esforços, o trator elétrico Fendt e107 V Vario Figura 87, surge como uma solução prática e eficiente para atender a esses novos requisitos do setor agrícola.

Figura 87 – Trator Fendt e107 V Vario



Fonte: Fendt (2023)

O trator elétrico Fendt e107 V Vario representa um avanço significativo rumo à agricultura sustentável, aliando eficiência energética, desempenho e tecnologia embarcada. Sua unidade de tração é composta por uma bateria de 100 kWh, um motor elétrico de alta eficiência e a transmissão continuamente variável Fendt Vario, proporcionando uma operação suave e eficaz.

O motor elétrico, sincronizado com a transmissão por meio do sistema de gerenciamento *Transmission Motor Suspension* (TMS), ilustrado na Figura 88, garante máxima eficiência na transferência de potência. Os eixos e a tomada de força dianteira são acionados diretamente pelo motor, minimizando perdas de energia e otimizando o desempenho.

Em termos de potência, o trator oferece diferentes modos de operação para se adequar à demanda energética de cada atividade. No modo Eco, que é ideal para tarefas leves como varredura ou dispersão de inverno, entrega até 50 kW (68 CV). O modo Dynamic libera 55 kW (75 CV) para aplicações mais exigentes, como pulverização, enquanto o modo Dynamic+ fornece até 66 kW (90 CV) por curtos períodos, ideal para situações que requerem potência extra, como subidas ou transporte de carga.

Figura 88 – Motor e Transmissão



Fonte: Fendt (2023)

A gestão inteligente de energia é um dos destaques do Fendt e107 V Vario, equipado com a função start-stop, o trator reduz o consumo durante períodos de inatividade, aumentando o tempo útil de operação. Além disso, o sistema de recuperação de energia regenera carga ao desacelerar ou dirigir em declives, contribuindo para estender a autonomia da máquina.

Esse processo pode ser intensificado com o uso de um pedal de regeneração, a bateria de 100 kWh garante entre 4 a 7 horas de trabalho em aplicações de carga

parcial e é mantida em temperatura ideal ao longo do ano por um sistema inteligente de gerenciamento térmico.

Para recarga, o trator oferece compatibilidade com diferentes tipos de infraestrutura. O carregamento em CA, ilustrado na Figura 89, pode ser feito com até 22 kW por meio de uma tomada Tipo 2 padrão automotivo, permitindo uma carga completa em aproximadamente 5 horas.

Figura 89 – Carregamento CA



Fonte: Fendt (2023)

Já o carregamento rápido em CC, ilustrado na Figura 90, com potência de até 80 kW via tomada *Combined Charging System* (CCS), permite atingir de 20% a 80% da carga em cerca de 45 minutos, garantindo retorno rápido às operações no campo.

Figura 90 – Carregamento CC



Fonte: Fendt (2023)

Em comparação com um motor de combustão interna, o motor elétrico alcança um nível de eficiência maior, pois há consideravelmente menos perdas, como, por exemplo, devido ao calor dissipado, dessa maneira, a energia fornecida é aproveitada de forma muito mais eficaz. Alinhado à proposta de desenvolvimento sustentável, o Fendt e107 V Vario incorpora diversas funcionalidades e tecnologias que promovem o uso mais eficiente da energia disponível

5.2.4.1 Avaliação do Desempenho Sustentável do Fendt e107 V Vario

O trator elétrico Fendt e107 V Vario representa uma inovação no segmento de tratores compactos, mesmo o trator elétrico pesando aproximadamente 200 kg a mais, isso não compromete sua estabilidade ou desempenho. O investimento inicial é um dos fatores mais contrastantes entre os modelos: o Fendt e107 V Vario custa entre €196.000 e €220.000, enquanto o 207 V Vario a diesel tem preço inicial de cerca de €122.994, tornando o modelo elétrico aproximadamente 1,6 a 1,8 vezes mais caro (FENDT, 2023).

No entanto, a maior economia operacional ao longo da vida útil, aliada à ausência de emissões de poluentes e à possibilidade de utilização de energia renovável, posiciona o trator elétrico como uma solução ambientalmente sustentável e economicamente viável a médio e longo prazo (FUTURE FARMING, 2023).

Além disso, o trator elétrico da Fendt contribui significativamente para a redução de ruído, fator importante em regiões urbanas e propriedades voltadas ao agroturismo. Também se destaca pela redução de custos com manutenção, já que não há necessidade de troca de óleo e filtros, comuns nos motores a combustão, dessa forma, mesmo com o alto custo inicial, a adoção de tratores elétricos como o Fendt e107 V Vario tende a crescer, impulsionada pela demanda por tecnologias de baixa emissão e pela busca por eficiência operacional no campo.

5.3 Aplicação Tratores Híbridos

Conforme Pascuzzi et al. (2023), os fabricantes de máquinas móveis não rodoviárias (NRMM) vêm respondendo às crescentes demandas por sustentabilidade por meio da busca por soluções tecnológicas e metodológicas que contribuam para a redução do uso de combustíveis fósseis e da emissão de poluentes, entre os principais objetivos dessas iniciativas estão a diminuição do impacto ambiental e a melhoria da eficiência operacional dos equipamentos.

No setor agrícola, uma das alternativas sustentáveis que mais ganha destaque é o desenvolvimento de tratores híbridos elétricos. Essa tecnologia surge como uma tendência promissora e pode, futuramente, se consolidar como a principal estratégia para a criação de sistemas de tração híbridos em NRMM. A combinação entre um ICE tradicional com um sistema elétrico de propulsão está diretamente alinhada com os princípios da agricultura sustentável, da preservação ambiental e da produção de alimentos com menor impacto ecológico.

Segundo Mocera et al. (2023), os veículos híbridos elétricos, que operam com um ICE de menor porte, podem superar as limitações dos veículos puramente elétricos a bateria para atender aos requisitos de produtividade, mas ainda produzem emissões locais devido à presença da unidade térmica.

Para alcançar o máximo de eficiência energética, torna-se essencial definir uma estratégia eficaz de gerenciamento de energia (EMS – *Energy Management Strategy*), que permita distribuir de maneira otimizada a demanda de potência entre o motor elétrico e o térmico.

Atualmente, a adoção de sistemas de tração híbridos em tratores agrícolas encontra-se em uma etapa inicial de desenvolvimento, enfrentando ainda diversos desafios tecnológicos, os tratores agrícolas são máquinas altamente versáteis, projetadas para executar diferentes tipos de tarefas no campo, como aração, aplicação de fertilizantes, preparo do solo e transporte de cargas. Essas atividades exigem uma ampla faixa de potência, que pode variar desde algumas dezenas até centenas de quilowatts, dependendo da operação (PASCUZZI et al., 2023).

No entanto, fatores como o elevado custo de produção e a limitada eficiência dos Sistemas De Armazenamento de Energia (ESS) atuais dificultam a popularização

dos tratores híbridos. Um dos principais entraves está na baixa densidade energética das baterias, que é significativamente inferior à do diesel aproximadamente 100 vezes menor. Em razão disso, espera-se que, ao menos no curto e médio prazo, os tratores híbridos continuem a utilizar motores a combustão interna em conjunto com sistemas elétricos de tração, configurando uma solução híbrida que busca equilibrar desempenho e sustentabilidade.

Por outro lado, Mocera et al. (2023) afirmam que, podem ser considerados os veículos elétricos com célula de combustível, que apresentam uma pilha de células de combustível para gerar energia elétrica a partir de reações de oxirredução, geralmente envolvendo hidrogênio e oxigênio.

Esses sistemas apresentam a vantagem de zero emissões locais e tempos de reabastecimento comparáveis aos veículos tradicionais a diesel. No entanto, exigem a presença de unidades auxiliares, como baterias ou supercapacitores, para atender plenamente à demanda de potência e, conseqüentemente, também requerem o desenvolvimento de uma Estratégia Adequada De Gerenciamento de Energia (EMS), além disso, o alto custo e o gerenciamento térmico das células de combustível são atualmente os principais obstáculos para sua aplicação.

Considerando a ampla variedade de soluções viáveis para a eletrificação de veículos, uma revisão que apresente as tendências e esforços atuais de pesquisa no campo das máquinas agrícolas é essencial, particularmente para investigar os caminhos mais escolhidos para melhorar a sustentabilidade e reduzir as emissões, a atenção estará voltada principalmente para tratores agrícolas, uma vez que são máquinas naturalmente versáteis, com uma visão adicional sobre a implementação da eletrificação.

De acordo com a nova definição proposta para o fator de hibridização, os protótipos existentes e as diversas configurações apresentadas na literatura foram classificados, a fim de destacar as tendências atuais em termos de hibridização de veículos. Essa nova abordagem permitirá avaliar os efeitos do armazenamento de energia a bordo, tanto em potência quanto em capacidade, influenciando os aprimoramentos gerais da arquitetura do sistema de propulsão. Tudo será apresentado considerando as limitações atuais dessas tecnologias, mas com uma perspectiva sobre as possibilidades de avanços futuros.

Complementando essa visão, Moreira (2022), destaca que o dimensionamento de topologias híbridas para aplicação em tratores agrícolas representa um desafio particularmente complexo, isso se deve não apenas à complexidade das configurações, mas também às duras condições do ambiente rural, que impõem exigências elevadas de resistência e robustez aos equipamentos.

Tratores devem operar em contextos hostis, sujeitos à ação de substâncias corrosivas, como o calcário, e a intensos esforços mecânicos causados pelas irregularidades do terreno, esses fatores geram distúrbios contínuos nos sistemas do trator, exigindo que o sistema de propulsão seja projetado com alto grau de confiabilidade para evitar falhas durante a operação.

Assim, torna-se evidente que a hibridização de tratores no meio agrícola envolve uma série de obstáculos técnicos e ambientais a serem superados. Ainda que represente um investimento elevado, o mercado demanda soluções sustentáveis que contribuam para a elevação do desempenho e da produtividade das operações agrícolas nesse contexto, as topologias híbridas apresentam-se como alternativas promissoras, sobretudo por suas vantagens em relação aos tratores convencionais, cabe, portanto, ao engenheiro projetista enfrentar os desafios associados ao dimensionamento e à implementação desses sistemas, promovendo a modernização de um setor essencial para a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável.

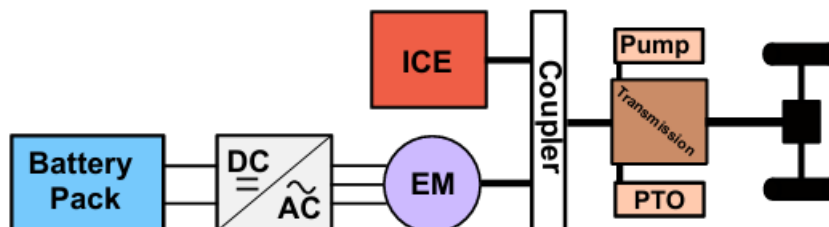
5.3.1 Híbrido Paralelo

Segundo Mocera et al. (2023), os sistemas de propulsão híbrida são compostos, no mínimo, por duas fontes distintas de energia que atuam em conjunto para suprir a demanda de potência exigida, a arquitetura híbrida paralela é considerada uma das configurações mais simples, especialmente quando o perfil de operação ou limitações estruturais, como o espaço físico disponível no veículo, inviabilizam a aplicação de um sistema totalmente elétrico.

Como representado na Figura 91, essa configuração consiste na conexão mecânica entre uma Máquina Elétrica (EM) e o motor a combustão interna. Isso permite que a máquina elétrica contribua com potência diretamente ao eixo de saída do ICE ou, dependendo de onde está posicionada, ao eixo da transmissão, além disso,

pode atuar na recuperação de energia, aplicando torque de frenagem para gerar eletricidade que será armazenada no banco de baterias.

Figura 91 – Arquitetura de Trator Totalmente Elétrico



Fonte: Mocera et al. (2023)

A utilização dessa configuração em tratores possibilita benefícios como: redução do tamanho do motor térmico, uma vez que os picos de potência são atendidos pelo sistema elétrico; otimização do ponto de operação do ICE, mantendo-o em faixas mais eficientes, inclusive durante transições de carga; e facilidade de integração com o projeto atual dos tratores, devido à menor quantidade de componentes adicionais exigidos.

Mas, o principal desafio dessa arquitetura reside no seu acoplamento mecânico com o ICE, apesar da flexibilidade oferecida pela máquina elétrica em adaptar-se à carga solicitada, a ligação física entre o motor a combustão e os demais sistemas de transmissão continua presente, isso impede o desacoplamento total entre a rotação do ICE e os componentes mecânicos que exigem potência, como as rodas, a TDP e os sistemas hidráulicos.

Mocera et al. (2023) também investigaram uma alternativa onde a combinação do ICE com a máquina elétrica alimenta uma transmissão hidrostática ligada à caixa de marchas, embora essa abordagem tenha aumentado as perdas energéticas devido à natureza da transmissão hidráulica, os resultados mostraram desempenho satisfatório em comparação aos modelos convencionais.

Essa solução permitiu o desacoplamento da rotação das rodas em relação ao ICE, viabilizando maior eficiência no uso do motor térmico aspecto que pode ser explorado em pesquisas futuras. No caso da TDP, o sistema permanece em uma

configuração paralela tradicional, o que não representa um problema crítico, já que sua rotação da TDP precisa ser constante, e as relações de engrenagem são projetadas para que o motor opere em sua rotação mais eficiente para economia de combustível ou em rotação máxima para potência máxima.

5.3.2 Híbrido em Série

Atualmente, os tratores são equipados com transmissões complexas que visam proporcionar a maior variedade possível de velocidades de operação, para atender às diversas exigências das atividades agrícolas, isso ocorre porque a rotação do ICE deve ser ajustada de acordo com cada tipo de tarefa.

Entretanto, a ligação mecânica entre o ICE e as rodas impede uma otimização ideal do funcionamento do motor, soma-se a isso o fato de que a TDP, normalmente conectada ao ICE, impõe ainda mais restrições operacionais, pois exige que o trator atenda simultaneamente à velocidade de deslocamento e à rotação do implemento.

Buscando resolver esse problema, os fabricantes vêm adotando transmissões hidrostáticas nos sistemas de tração, o que permite desacoplar a velocidade do trator da rotação do ICE e da TDP embora com perdas de eficiência e aumento das exigências no gerenciamento térmico, o que demanda sistemas de resfriamento dedicados.

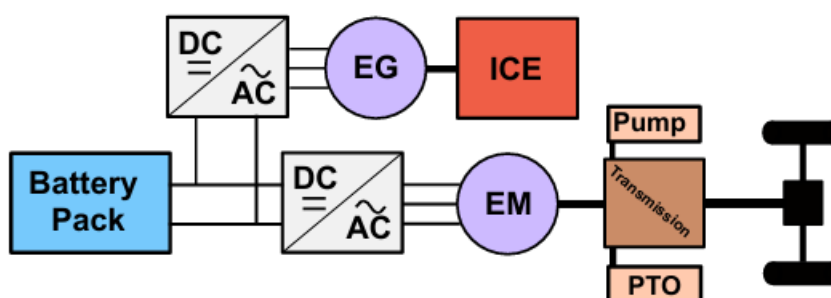
Na prática agrícola moderna, é essencial que os veículos ofereçam ampla flexibilidade nas faixas de velocidade para se adaptarem às diferentes operações no campo. Isso ocorre porque o controle da rotação do motor a combustão precisa acompanhar as exigências específicas de cada tarefa. Contudo, o vínculo direto entre o propulsor e o sistema de tração limita a possibilidade de explorar o desempenho ideal do motor. Além disso, a conexão direta da tomada de potência ao motor impõe exigências simultâneas de velocidade e rotação para o acionamento dos implementos, o que compromete a autonomia operacional do conjunto.

Como resposta a essas limitações, soluções baseadas em tração hidrostática têm sido integradas aos projetos mais recentes, possibilitando o controle independente entre deslocamento, rotação do motor e acionamento da TDP. No

entanto, essa configuração traz desafios adicionais, como a necessidade de lidar com perdas térmicas e a consequente demanda por sistemas dedicados de arrefecimento.

A introdução da eletrificação oferece novas possibilidades para otimizar o desempenho do ICE, a arquitetura híbrida em série, ilustrada na Figura 92, permite separar completamente o motor de combustão das conexões mecânicas do trator.

Figura 92 – Arquitetura de Trator Híbrido em Série



Fonte: Mocera et al. (2023)

Nesse tipo de sistema, uma máquina elétrica converte a potência do ICE em energia elétrica, que é então utilizada por um ou mais motores elétricos responsáveis por acionar diretamente os componentes que exigem potência, como rodas e TDP, a ESS funciona como um buffer energético, garantindo energia para atender aos picos de demanda.

Embora o ESS não seja essencial em todas as situações desde que o gerador tenha controle preciso a resposta lenta do ICE diante de variações súbitas de carga torna o uso do ESS vantajoso, essa configuração híbrida em série também é conhecida como transmissão elétrica ou eixo elétrico.

O ESS introduz a possibilidade atender picos de demanda sem depender diretamente do ICE, e armazena energia recuperada durante a frenagem regenerativa, assim o ICE pode operar com maior eficiência, mantendo uma potência média mais estável.

Com o aumento do nível de eletrificação e o dimensionamento adequado do ESS, é possível reduzir o tamanho do motor térmico. No entanto, esse tipo de arquitetura demanda maior investimento e complexidade de integração no trator,

devido à necessidade de múltiplos conversores de potência e sistemas térmicos dedicados ao resfriamento dos componentes elétricos, cujas faixas de temperatura são distintas das do ICE. Apesar das dificuldades técnicas, essa abordagem oferece o maior potencial de ganho em eficiência entre as arquiteturas híbridas, o desacoplamento entre o motor e as rodas permite que o sistema funcione como uma Transmissão Continuamente Variável Elétrica (eCVT), mais eficiente do que as transmissões hidrostáticas atualmente utilizadas.

5.3.3 AUGA M1

De acordo com informações divulgadas pela AUGA GROUP (2025), a empresa lituana especializada na produção de alimentos orgânicos, obteve em janeiro de 2024 uma patente nos Estados Unidos referente à estrutura do trator híbrido

AUGA M1, ilustrado na Figura 93, desenvolvido para operações em grandes propriedades agrícolas. O modelo, concebido e montado na Lituânia, é alimentado por um sistema híbrido composto por biometano e acionamentos elétricos, apresentando capacidade de funcionamento contínuo por até 12 horas, dados fornecidos pela própria empresa indicam que o uso deste trator pode reduzir as emissões de dióxido de carbono em até 114 toneladas por ano, quando comparado a tratores convencionais movidos a diesel.

Figura 93 – Trator Híbrido AUGA M1



Fonte: AUGA YT Channel (2023)

A motivação para o desenvolvimento do AUGA M1 surgiu da necessidade de soluções sustentáveis que permitissem aos agricultores realizarem suas atividades com menor impacto ambiental, além de oferecer aos consumidores produtos de menor pegada de carbono, desde o início do projeto, a equipe de engenharia da AUGA buscou superar os principais desafios técnicos que limitavam a viabilidade de tratores a gás no setor agrícola.

Durante os testes e desenvolvimento, foram implementadas melhorias significativas no sistema de acionamento elétrico, com foco na redução das perdas energéticas e no aumento da eficiência global, houve, ainda, um aprimoramento estrutural que resultou na diminuição do peso do equipamento, contribuindo para um menor consumo energético e reduzida compactação do solo.

A versão comercial do AUGA M1 integra componentes de fabricantes reconhecidos globalmente, incluindo um motor de combustão interna da Ford e uma cabine CLAAS, a empresa também atualizou o projeto visual e funcional do trator, consolidando a versão atual como a base para futuras produções em escala.

Segundo o Pardeshi (2022), o AUGA M1 é um trator de grande porte, com dimensões expressivas seis metros de comprimento e quatro metros de largura e capacidade para tracionar implementos de até sete metros, como cultivadores. Atinge velocidade máxima de 12 km/h, o que, combinado com sua força de tração e autonomia, o posiciona como um concorrente direto de tratores convencionais com potência na faixa dos 400 CV.

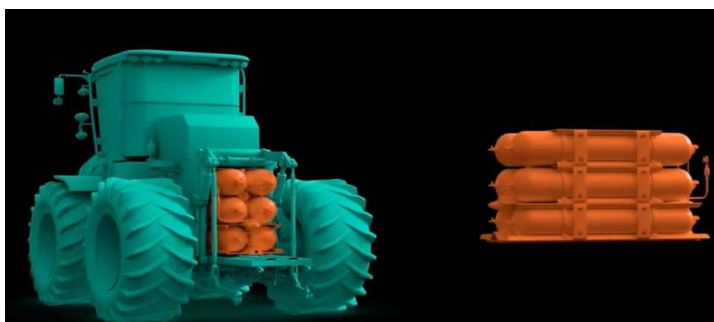
O diferencial tecnológico do AUGA M1 está na superação de dois obstáculos históricos para os tratores movidos a gás: a limitação de autonomia e a falta de infraestrutura de reabastecimento. Modelos anteriores existentes no mercado eram capazes de operar por apenas 4 horas devido à limitação de espaço físico para acomodar os cilindros de gás. O projeto desenvolvido pela equipe lituana possibilitou a integração de cilindros de biometano de maior capacidade ao chassi do trator, estendendo significativamente sua autonomia operacional.

Além disso, o AUGA M1 adota um sistema híbrido inovador, combinando o motor a biometano com um motor elétrico auxiliar, que entra em ação automaticamente nas situações de maior demanda energética. Essa solução permite não apenas uma operação mais eficiente, mas também contribui para a redução do

consumo total de combustível e das emissões durante o trabalho em campo. A combinação entre autonomia ampliada, menor impacto ambiental e versatilidade operacional reforça o potencial do AUGA M1 como uma alternativa viável e sustentável para a mecanização agrícola em larga escala.

De acordo com Pardeshi (2022), os cartuchos foram posicionados de forma estratégica próximos ao eixo traseiro, ilustrado na Figura 94, otimizando o espaço e a distribuição de peso.

Figura 94 – Cartuchos com Biometano



Fonte: Pardeshi (2022)

Além disso, foi adotado um sistema de recarga modular, no qual os cartuchos de biometano são abastecidos fora do trator, ilustrados na Figura 95 em plantas de produção de biometano e transportados diretamente até as propriedades rurais, essa abordagem elimina a necessidade de infraestrutura fixa de reabastecimento nas fazendas, tornando o sistema mais flexível e viável economicamente.

Figura 95 – Abastecimento dos Cartuchos com Biometano



Fonte: AUGA YT Channel (2023)

O sistema de propulsão do AUGA M1 opera por meio de um motor de combustão interna que utiliza biometano como combustível, responsável por gerar energia elétrica que é diretamente transmitida aos motores elétricos que acionam as rodas, em situações de baixa demanda energética, o sistema armazena a energia excedente em baterias, evitando desperdício.

Com isso, mesmo utilizando um motor de menor porte, o trator é capaz de atender a exigências elevadas de potência quando necessário, a proposta tecnológica da AUGA Tech visa não apenas à descarbonização das operações agrícolas, mas também à melhoria da produtividade e à redução de custos operacionais.

A eletricidade, quando comparada ao diesel, apresenta menor custo por unidade de energia, favorecendo a economia dos produtores. Além disso, nos períodos de ociosidade por aproximadamente 265 dias por ano, as baterias dos tratores podem ser utilizadas para armazenamento de energia e serviços de balanceamento da rede elétrica, gerando receitas adicionais para as propriedades.

Em síntese, o AUGA M1 representa um avanço significativo na adoção de energias renováveis no setor agrícola, ao unir biometano e eletrificação como alternativas viáveis e sustentáveis para substituir o uso de combustíveis fósseis em máquinas agrícolas.

5.3.4 T6 Methane Power

Segundo Freulon (2022), a New Holland apresentou o primeiro protótipo do trator T6 Methane Power, ilustrado na Figura 96, durante a feira Agritechnica 2013, marcando o início de uma trajetória voltada à utilização de combustíveis alternativos no setor agrícola.

Nesta versão inicial, o trator era equipado com um motor a gás de 3,4 litros e quatro cilindros, proveniente da gama de motores utilitários da Iveco, já em 2015, a empresa introduziu melhorias substanciais, instalando sob o capô um motor agrícola de seis cilindros e 6,7 litros, especialmente modificado para operar com gás metano em vez de diesel.

Em 2017, a New Holland revelou um segundo protótipo na *Agritechnica*, com um design futurista e inovações tecnológicas notáveis, como uma cabine redesenhada e uma tela central embutida no volante.

Figura 96 – Trator T6 Methane Power



Fonte: NEW HOLLAND AGRICULTURE (2025)

O motor NEF 6.7L que equipa o T6 Methane Power foi desenvolvido pela FPT Industrial, empresa com mais de 20 anos de experiência em tecnologias de *powertrain* movidas a gás natural, para sua adaptação ao uso do metano, o motor recebeu diversas modificações, como a implementação de um sistema de injeção a 11 bar, pistões reforçados para suportar o maior calor de combustão e a adição de velas de ignição, necessárias para a ignição da mistura ar-combustível.

De acordo com sua ficha técnica, o T6 Methane Power apresenta desempenho de potência e torque equivalente ao de um trator T6 convencional a diesel, mantendo a capacidade de realizar as mesmas tarefas operacionais, isso garante ao produtor uma operação mais sustentável, sem perda de rendimento e com custos operacionais reduzidos.

Um dos principais diferenciais desse modelo é a sua tecnologia de pós-tratamento simplificada, viabilizada pela queima limpa do metano e do biometano. Esses combustíveis geram emissões até 80% menores em relação ao diesel, eliminando a necessidade de sistemas complexos de controle de emissões, um

catalisador de três vias, leve e compacto, é suficiente para garantir a conformidade ambiental, sendo instalado sob o capô do motor.

Além disso, o trator conta com o sistema de Gestão de Velocidade do Motor, que mantém com precisão a rotação necessária para a TDP, mesmo sob variações de carga, essa função é ideal para aplicações que exigem constância na velocidade, como em terrenos acidentados ou na operação de implementos especializados.

No que se refere à hidráulica, o T6 Methane Power é equipado com um sistema *Closed Center Load Sensing* (CCLS), que fornece até 121 litros por minuto, garantindo desempenho adequado mesmo em implementos exigentes, como colhedoras de hortaliças. O sistema opera com eficiência energética, fornecendo potência hidráulica somente quando necessário, além disso, possui uma bomba hidráulica de serviço separada, com capacidade de 47 litros por minuto assegurando leveza na direção e ciclos ágeis da carregadeira frontal, independentemente da carga hidráulica.

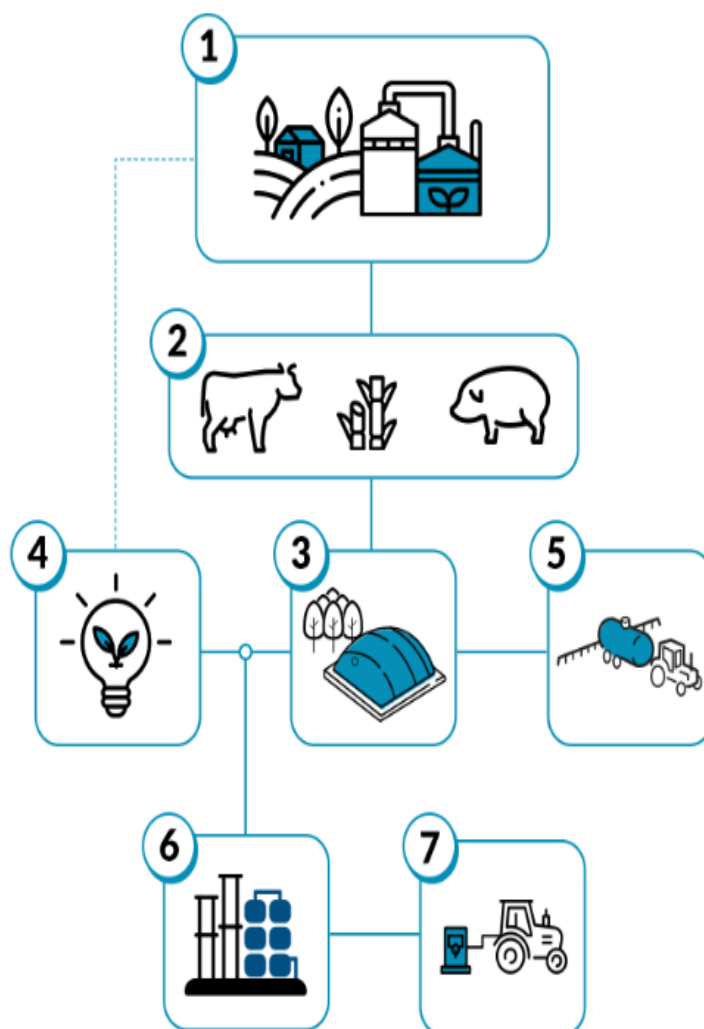
A adoção do biometano como combustível é um dos pilares da proposta sustentável do T6 Methane Power, o biometano é obtido a partir da purificação do biogás, ilustrado na Figura 97, gerado pela decomposição de matéria orgânica, como resíduos vegetais e animais, dejetos da suinocultura, restos da cana-de-açúcar, entre outros.

Além de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa, o uso do biometano possibilita maior autonomia ao produtor rural, já que o combustível pode ser gerado na própria propriedade a partir de resíduos agrícolas e pecuários. Essa característica reduz a dependência de combustíveis fósseis e cria um ciclo produtivo mais eficiente, em que subprodutos da atividade agropecuária retornam ao processo na forma de energia renovável.

Outro ponto relevante é a previsibilidade de custos, uma vez que o biometano produzido localmente tende a reduzir a vulnerabilidade do agricultor frente às oscilações do mercado de energia. Além disso, ao integrar práticas de economia circular, o sistema contribui para uma gestão ambiental mais responsável, diminuindo o descarte inadequado de resíduos e promovendo a valorização dos recursos disponíveis na propriedade.

Esse processo ocorre em biodigestores, onde, por meio da digestão anaeróbica, micro-organismos decompõem a matéria orgânica, liberando uma mistura de metano (CH_4) e CO_2 .

Figura 97 – Processo de obtenção do Biometano



Fonte: New Holland Agriculture (2025)

Após a produção do biogás, ele pode ser parcialmente utilizado para geração de eletricidade e calor na propriedade rural, o subproduto do processo, rico em nutrientes, também pode ser aproveitado como fertilizante orgânico, promovendo o fechamento do ciclo de nutrientes no solo.

Para ser utilizado como combustível, o biogás precisa passar por um processo de purificação, removendo CO₂, vapor d'água, Sulfeto de Hidrogênio (H₂S) e outros contaminantes, até atingir mais de 95% de pureza, tornando-se assim biometano, o produto possui qualidade equivalente ao GNV, podendo ser comprimido, armazenado e utilizado como combustível limpo para tratores e outros veículos agrícolas, substituindo o diesel e reduzindo significativamente as emissões de gases poluentes.

Portanto, o New Holland T6 Methane Power representa um avanço significativo na transição energética do setor agrícola, unindo robustez operacional, sustentabilidade ambiental e redução de custos, a utilização do biometano, produzido a partir de resíduos da própria atividade agrícola, reforça um modelo de agricultura circular e de baixa emissão de carbono, contribuindo diretamente para o futuro sustentável do campo.

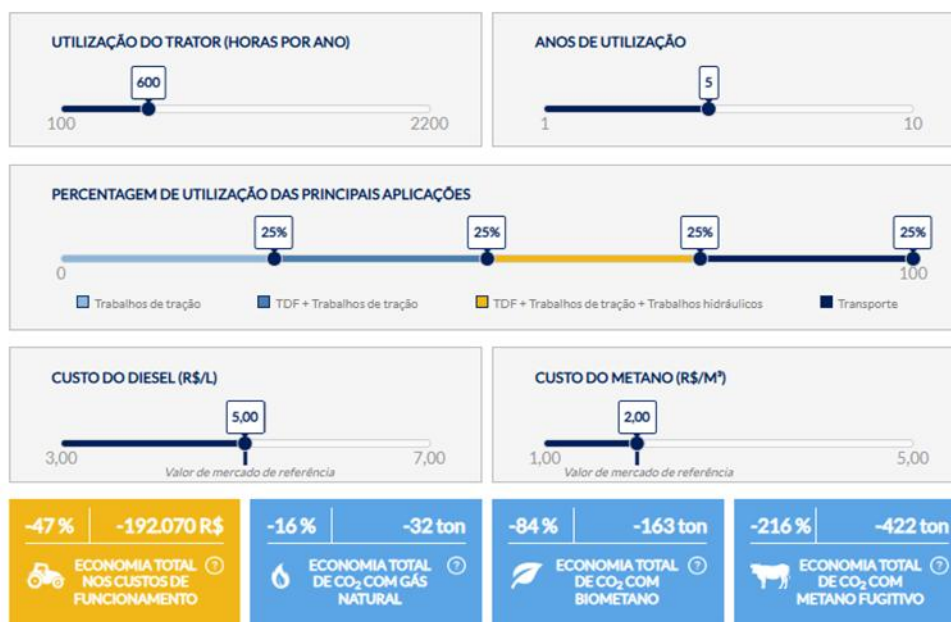
Além dos benefícios ambientais e operacionais, a adoção do biometano como fonte energética no meio rural também promove maior autonomia energética para os produtores. Ao transformar resíduos orgânicos, como esterco, restos de culturas e outros subprodutos, em combustível, reduz-se a dependência de combustíveis fósseis e os custos com insumos externos. Essa integração entre produção agrícola e geração de energia fortalece a resiliência das propriedades rurais frente às oscilações do mercado e às exigências ambientais cada vez mais rigorosas, posicionando o setor agrícola como protagonista na transição para uma matriz energética mais limpa e descentralizada.

5.3.4.1 Avaliação do Desempenho Sustentável do T6 Methane Power

A Figura 98, apresenta uma simulação dos benefícios econômicos e ambientais associados à utilização do trator New Holland T6 Methane Power, considerando-se uma média de 600 horas de operação anual, ao longo de cinco anos de uso.

A análise contempla a distribuição igualitária de 25% entre quatro principais aplicações operacionais: trabalhos de tração, TDP combinada com tração, TDP com tração e trabalhos hidráulicos e operações de transporte.

Figura 98 – Simulação dos Benefícios Econômicos e Ambientais



Fonte: New Holland Agriculture (2025)

Com base nos valores de mercado de referência, estabeleceu-se o custo do diesel em R\$ 5,00 por litro e do metano em R\$ 2,00 por metro cúbico. Nessas condições, observa-se uma redução total de 47% nos custos operacionais, o que representa uma economia acumulada de R\$ 192.070,00 ao final do período de análise.

Do ponto de vista ambiental, os resultados demonstram reduções significativas nas emissões CO₂, quando comparadas ao uso do diesel convencional. A substituição pelo gás natural proporciona uma diminuição de 16% nas emissões, equivalente a 32 toneladas de CO₂. A adoção do biometano permite uma redução ainda mais expressiva, de 84%, totalizando 163 toneladas de CO₂ evitadas, quando se considera o uso de metano de origem fugitiva, proveniente de resíduos orgânicos agropecuários,

a redução ultrapassa os 216%, correspondendo a 422 toneladas de CO₂, ao converter um passivo ambiental em fonte energética.

Tais dados reforçam a viabilidade técnica e ambiental da utilização do trator T6 Methane Power, evidenciando seu papel estratégico na transição energética no setor agrícola. A integração com sistemas de produção de biometano a partir de resíduos agroindustriais promove não apenas a redução de custos, mas também a valorização de práticas sustentáveis, alinhadas com os princípios da agricultura de baixo carbono.

6 CONCLUSÃO - COMPARAÇÃO ECONÔMICA E TECNOLÓGICA

Nas últimas décadas, o avanço tecnológico e a crescente preocupação com as questões ambientais têm impulsionado mudanças significativas na forma como diferentes setores produtivos lidam com a mobilidade e o uso de energia. Em especial, os ramos da mineração, da agricultura e do transporte rodoviário vêm enfrentando o desafio de equilibrar produtividade, eficiência econômica e responsabilidade ambiental. Diante da crescente pressão por práticas mais sustentáveis, a substituição dos veículos convencionais movidos a combustíveis fósseis por alternativas menos poluentes tornou-se um caminho inevitável.

Nesse cenário, tecnologias como os VEBs, HEVs, movidos a biocombustíveis e células a hidrogênio vêm sendo estudadas e testadas como possíveis soluções para atender às demandas específicas de cada setor. No entanto, a escolha da melhor alternativa sustentável não depende apenas da redução de emissões de gases poluentes, mas também da viabilidade econômica, da infraestrutura necessária para operação e manutenção, da autonomia dos veículos e da adequação ao tipo de trabalho realizado.

Cada um desses segmentos de mineração, agrícola e rodoviário apresenta características próprias que influenciam diretamente na escolha da tecnologia mais adequada. A mineração, por exemplo, exige máquinas de grande porte e alta resistência em ambientes extremos. Já o setor agrícola precisa de soluções que combinem força, mobilidade e autonomia em áreas remotas. Por fim, o transporte rodoviário demanda eficiência energética e alcance em longas distâncias, com foco no custo por quilômetro rodado e na logística de abastecimento ou recarga.

Este trabalho tem como objetivo analisar e comparar as principais alternativas tecnológicas sustentáveis disponíveis para veículos utilizados nesses três setores, considerando aspectos econômicos e operacionais. A partir dessa análise, busca-se identificar quais soluções apresentam maior potencial de aplicação prática, contribuindo para um futuro mais eficiente e ambientalmente responsável.

6.1 Comparativo no Segmento Rodoviário

O setor de transporte rodoviário de cargas desempenha um papel fundamental na logística nacional e internacional, sendo responsável por grande parte da movimentação de mercadorias em diversos países. No entanto, sua forte dependência de combustíveis fósseis, especialmente o diesel, coloca o segmento no centro das discussões sobre a necessidade de transição para modelos mais sustentáveis. A busca por alternativas menos poluentes e economicamente viáveis tem impulsionado o desenvolvimento de novas tecnologias de propulsão para veículos pesados, com destaque para os caminhões movidos a eletricidade e a gás natural veicular.

Cada uma dessas tecnologias oferece vantagens e desafios distintos. Os veículos elétricos prometem reduzir significativamente os níveis de ruído e diminuir os custos operacionais a longo prazo, especialmente com relação à manutenção e ao consumo energético. No entanto, ainda enfrentam limitações importantes, como alto custo inicial, autonomia restrita e necessidade de infraestrutura adequada para recarga.

Por outro lado, os caminhões movidos a GNV representam uma alternativa mais madura e de aplicação imediata, com menor impacto ambiental em comparação ao diesel, além de oferecerem uma redução relevante nas emissões de CO₂ e material particulado. Contudo, o GNV ainda é um combustível fóssil, e seu desempenho pode variar de acordo com a disponibilidade da rede de abastecimento e as condições operacionais de uso.

Este estudo tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre essas duas tecnologias elétrica e GNV no contexto do transporte rodoviário pesado, avaliando fatores como viabilidade econômica, autonomia, infraestrutura necessária, impactos ambientais e perspectivas de longo prazo.

6.1.1 Vantagens e Desvantagens Propulsão Elétrica

A transição para caminhões elétricos tem sido impulsionada por questões ambientais, econômicas e tecnológicas, tornando-se um dos principais focos da indústria de transporte. No entanto, de acordo com Reis & Ferreti (2024) apesar dos benefícios significativos, essa mudança ainda enfrenta desafios operacionais e estruturais que precisam ser analisados de forma detalhada.

Os caminhões elétricos apresentam uma série de vantagens que os tornam atrativos para o setor logístico e industrial. No entanto, como qualquer tecnologia emergente, eles também possuem limitações que podem impactar sua adoção em larga escala. A seguir, serão abordadas as principais vantagens e desvantagens desse tipo de veículo, bem como as razões que justificam cada um desses aspectos.

Os caminhões elétricos oferecem diversos benefícios em relação aos modelos tradicionais movidos a combustíveis fósseis. Essas vantagens vão desde ganhos ambientais até economia de custos operacionais, tornando-os uma alternativa cada vez mais viável para o transporte rodoviário.

Sustentabilidade Ambiental

Um dos maiores atrativos dos caminhões elétricos é a redução significativa na emissão de gases de efeito estufa. Diferentemente dos caminhões a diesel, que contribuem expressivamente para a poluição do ar, os modelos elétricos operam com zero emissões diretas de CO₂, ajudando a minimizar os impactos ambientais (Reis & Ferreti, 2024). Já para Assumpção (2016) além disso, a matriz energética brasileira, predominantemente renovável, permite que esses veículos tenham uma pegada de carbono ainda menor.

Redução de Custos Operacionais

Os custos operacionais de um caminhão elétrico são consideravelmente menores quando comparados aos caminhões movidos a combustíveis fósseis. O custo por quilômetro rodado é reduzido devido ao preço da eletricidade ser mais estável e previsível do que o do diesel (SOUZA & BRAND, 2023). Além disso, os

motores elétricos possuem menos peças móveis, diminuindo a necessidade de manutenção corretiva e prolongando a vida útil do veículo (Antunes, 2018).

Ruído

Conforme Figueiredo (2023) uma das grandes vantagens dos veículos elétricos é o baixo nível de ruído. Como eles não possuem motor a combustão, o som durante a condução é quase inexistente, o que torna a experiência bem mais confortável, tanto para quem dirige quanto para quem está por perto. Isso ajuda a reduzir a poluição sonora nas cidades, o que é ótimo para a saúde pública e para o bem-estar geral.

Esse silêncio é tão marcante que, em alguns lugares, já existe até exigência para que os elétricos emitam sons artificiais em baixa velocidade — só para garantir que pedestres percebam sua presença, especialmente pessoas com deficiência visual.

Segurança

Quando o assunto é segurança, para Freitas (2012) os veículos elétricos saem na frente em vários aspectos especialmente quando comparamos com os que utilizam GNV. A começar pela estrutura dos próprios sistemas enquanto o GNV exige cilindros de alta pressão, que podem oferecer riscos em caso de impactos ou vazamentos, os elétricos operam com baterias bem protegidas, geralmente posicionadas em áreas estratégicas do veículo para minimizar danos em colisões.

Além disso, os carros elétricos passam por testes rigorosos de segurança, incluindo simulações de acidentes para verificar o comportamento das baterias. A tecnologia avançada de gerenciamento térmico e os sistemas automáticos de desligamento em caso de anomalia ajudam a evitar incêndios e curtos-circuitos. Já no caso do GNV, apesar de ser seguro quando instalado corretamente, qualquer falha na manutenção pode gerar vazamentos perigosos especialmente em ambientes fechados, o que ainda é uma preocupação constante para muitos usuários. (Freitas, 2012)

Outro ponto importante é que os sistemas elétricos modernos contam com sensores e softwares inteligentes que monitoram constantemente a integridade da bateria e outros componentes vitais. Esses recursos permitem que o condutor seja

alertado sobre qualquer problema antes mesmo que ele se torne algo mais sério. No GNV, a detecção de vazamentos depende mais de inspeções visuais e manutenção manual, o que pode aumentar a margem de erro e colocar em risco a segurança do veículo e dos ocupantes.

Portanto, embora todos os tipos de veículos ofereçam algum nível de risco, os elétricos vêm demonstrando uma superioridade significativa em termos de segurança passiva e ativa. Isso os torna uma alternativa não apenas mais ecológica, mas também mais confiável no dia a dia.

Baixa manutenção e presença de peças móveis

Seguindo o trabalho sobre a mobilidade sustentável de Correia (2020) a manutenção de elétricos tem se destacado como uma de suas maiores vantagens em comparação aos modelos a combustão. Isso se deve, em grande parte, à simplicidade do seu sistema mecânico. Diferentemente dos carros tradicionais, os elétricos não possuem componentes como velas de ignição, correias, filtros de óleo ou sistemas de escapamento. Com menos peças móveis e menos sistemas sujeitos ao desgaste, a probabilidade de falhas e a necessidade de manutenção corretiva diminuem significativamente

Além disso, um diferencial importante é o sistema de frenagem regenerativa, comum nos modelos elétricos. Esse mecanismo utiliza a própria energia gerada durante a desaceleração para recarregar a bateria, reduzindo o uso dos freios convencionais. Como consequência, os discos e pastilhas de freio se desgastam mais lentamente, o que contribui para aumentar os intervalos entre as revisões e diminuir os custos com reposição de peças. (Correia, 2020)

Outro ponto relevante é a ausência de trocas frequentes de óleo e revisões mecânicas complexas. Como não há motor a combustão, grande parte das manutenções periódicas tradicionais é simplesmente eliminada. Isso se traduz em uma experiência de uso mais prática e econômica, especialmente para motoristas que desejam reduzir os gastos com serviços automotivos.

As revisões em veículos elétricos ainda ocorrem, mas tendem a ser mais espaçadas e voltadas para atualizações de software, verificação de sistemas eletrônicos e análise do estado da bateria. Em alguns casos, fabricantes oferecem atualizações remotas, dispensando inclusive a necessidade de deslocamento até uma oficina, o que agrega ainda mais praticidade ao usuário.

Apesar das diversas vantagens, os caminhões elétricos ainda enfrentam desafios que podem limitar sua adoção em larga escala. Questões como o alto custo inicial, limitações de infraestrutura e autonomia restrita são pontos que ainda precisam ser superados para que essa tecnologia se torne amplamente viável.

Alto Custo Inicial

Apesar da economia operacional, o investimento inicial em caminhões elétricos ainda é elevado. O custo de aquisição pode ser 50% a 100% maior do que um caminhão a diesel convencional, principalmente devido ao alto preço das baterias (Reis & Ferretti, 2024).

Esse fator pode ser um obstáculo para pequenas e médias empresas que desejam adotar a tecnologia, mas não possuem capital suficiente para realizar esse investimento (Antunes, 2018).

Infraestrutura de Recarga Limitada

Segundo Callil & Costanzo (2022) um dos principais desafios enfrentados pelos caminhões elétricos é a falta de infraestrutura adequada para recarga. Diferente dos postos de abastecimento de diesel, que estão amplamente distribuídos, as estações de recarga para veículos elétricos ainda são escassas em muitos países, incluindo o Brasil. Além disso, o tempo necessário para uma recarga completa pode ser um fator limitante, especialmente em operações de longas distâncias (ASSUMPÇÃO, 2016).

Autonomia e Tempo de Recarga

Embora a tecnologia de baterias esteja avançando, a autonomia dos caminhões elétricos ainda é inferior à dos modelos movidos a diesel. Muitos modelos elétricos oferecem uma autonomia entre 200 e 400 km por carga, o que pode ser insuficiente para certas operações logísticas que exigem percursos mais longos (Antunes, 2018). Além disso, o tempo de recarga pode levar de 1 a 4 horas, dependendo do tipo de carregador utilizado, o que impacta diretamente a produtividade da frota (Reis & Ferretti, 2024).

Capacidade de Carga Reduzida

As baterias dos caminhões elétricos ocupam um espaço considerável e adicionam um peso significativo ao veículo. Isso pode resultar em uma redução da capacidade de carga útil, limitando a quantidade de mercadorias transportadas em comparação com um caminhão a diesel da mesma categoria (Assumpção, 2016).

Ao analisar os prós e contras dos caminhões elétricos, observa-se que essa tecnologia oferece grandes avanços em termos de sustentabilidade e eficiência, mas ainda enfrenta barreiras econômicas e estruturais que dificultam sua ampla adoção. As vantagens, como emissão zero, menor custo operacional e maior eficiência energética, tornam os caminhões elétricos uma solução atraente para operações urbanas e para empresas que buscam reduzir seu impacto ambiental. No entanto, os desafios relacionados ao alto custo inicial, à infraestrutura de recarga limitada e à menor autonomia ainda representam entraves para a substituição total dos modelos a diesel.

A escolha entre um caminhão elétrico e um GNV dependerá do tipo de operação e das condições de infraestrutura disponíveis. Para trajetos curtos e operações dentro de cidades, os caminhões elétricos já demonstram viabilidade e competitividade. Em contrapartida, para operações de longa distância, ainda há um caminho a ser percorrido até que essa tecnologia se torne plenamente eficiente e economicamente vantajosa. Com o avanço tecnológico e o apoio de políticas governamentais, espera-se que os desafios atuais sejam mitigados, permitindo que os caminhões elétricos se consolidem como uma alternativa viável para o transporte de cargas pesadas.

6.1.2 Vantagens e Desvantagens Propulsão por GNV

Abordamos no capítulo 3.2 o uso da tecnologia GNV em veículos pesados focados na aplicação em veículos rodoviários, e observou-se que não só é uma solução muito promissora, mas que também já é nossa realidade, derivado do gás natural, o GNV oferece uma queima mais limpa em comparação aos combustíveis fósseis tradicionais, como o diesel, o que o torna uma opção atrativa do ponto de vista ambiental. No entanto, sua aplicação em veículos pesados ainda envolve desafios técnicos, logísticos e econômicos. Avaliar suas vantagens e desvantagens é essencial para entender sua viabilidade em larga escala nesse segmento, algo que vamos cuidadosamente discutir neste tópico.

Vantagens do Uso do GNV

Seguindo as ideias de Kragha (2010) uma das vantagens do GNV é que ele permite a conversão de veículos já existentes, isso significa que, ao invés de comprar um carro novo, o proprietário pode adaptar o que já possui, o que torna essa opção muito mais acessível financeiramente, o processo de instalação de kits de conversão é bem difundido e, em muitos casos, o custo se paga com a economia gerada no uso diário, principalmente para quem roda bastante, como taxistas e motoristas de aplicativo

Apesar dessa vantagem inicial, é importante considerar que o GNV também exige revisões periódicas e cuidados específicos, como inspeções técnicas obrigatórias e verificação de vazamentos. Esses fatores geram custos adicionais ao longo do tempo e podem impactar a decisão de quem busca uma solução totalmente livre de manutenção extra.

Por outro lado, os veículos elétricos ainda apresentam um custo de aquisição mais elevado quando comparados a modelos a combustão, incluindo os convertidos para GNV. Mesmo com incentivos governamentais em alguns países, o preço inicial continua sendo uma barreira para grande parte dos consumidores, o que dificulta sua

adoção em massa, especialmente em mercados emergentes (PLOTKIN & SINGH, 2025)

Contudo, é importante destacar que os elétricos compensam no longo prazo com menor custo de operação e manutenção. Ainda assim, para quem busca uma solução de curto prazo com menor investimento inicial, o GNV segue sendo uma alternativa viável e amplamente utilizada, mesmo que demande um pouco mais de cuidado técnico com o tempo (KRAGHA, 2010).

Hodge & Ruff (2015) adicionam também que o preço do GNV tem se mantido mais estável ao longo do tempo, o que ajuda empresas de transporte a reduzirem seus custos operacionais, em comparação ao diesel, o gás natural tem uma precificação menos volátil, protegendo empresas de oscilações bruscas no mercado de combustíveis. A eficiência energética do GNV permite uma economia significativa por quilômetro rodado, o que pode resultar em uma redução expressiva nos gastos operacionais de grandes frotas.

Enquanto os veículos elétricos ainda enfrentam longos tempos de recarga e uma infraestrutura que avança lentamente, principalmente fora dos grandes centros, o GNV aparece como uma solução mais prática e madura para o transporte pesado, os postos de abastecimento de GNV já existem em maior número e, com os investimentos recentes, a tendência é cobrir rotas estratégicas com mais facilidade e agilidade. Logo o tempo de abastecimento do GNV é bem mais competitivo, enquanto um caminhão elétrico pode levar horas para recarregar totalmente, um veículo a GNL pode ser reabastecido em cerca de 15 minutos praticamente o mesmo tempo que um diesel tradicional.

Desafios e Limitações

Apesar de suas vantagens, a adoção do GNV ainda enfrenta desafios significativos. Um dos principais obstáculos é o custo inicial para a conversão ou aquisição de veículos adaptados para esse combustível, a adaptação exige investimentos elevados tanto na conversão dos motores quanto na adequação dos sistemas de abastecimento e armazenamento do gás. Esse fator pode dificultar a

viabilidade financeira para pequenas empresas e motoristas autônomos, que muitas vezes não dispõem de recursos para essa transição (KRAGHA, 2025).

Já para Smith (2020) a infraestrutura para abastecimento de GNV ainda é limitada em diversas regiões, embora grandes centros urbanos contem com postos de abastecimento, áreas rurais e rotas de transporte de longa distância podem não ter disponibilidade suficiente, dificultando a logística para veículos pesados. Empresas que optam pelo GNV precisam planejar cuidadosamente suas operações logísticas para garantir que seus veículos possam reabastecer sem comprometer prazos de entrega, a expansão da infraestrutura depende de investimentos governamentais e privados, tornando este um fator crítico para a viabilidade do GNV.

Outra limitação importante é a menor autonomia dos veículos movidos a GNV em comparação aos movidos a diesel, isso significa que precisam reabastecer com mais frequência, o que pode representar um problema para operações logísticas que exigem longos períodos de viagem sem interrupções, tecnologias híbridas e melhorias nos tanques de armazenamento podem ajudar a minimizar essa limitação no futuro (WERPY ET AL, 2010).

Finalizando com uma visão de Hodge & Ruff (2015) também existem questões relacionadas à disponibilidade do gás natural e à infraestrutura necessária para sua produção e distribuição, o fornecimento contínuo depende de investimentos robustos em redes de distribuição e terminais de abastecimento, que ainda não estão plenamente desenvolvidos em diversas regiões do mundo.

6.1.3 Análise Econômica de Veículos Pesados

Agora falaremos um pouco da comparação econômica das tecnologias de veículos pesados, com uma atenção especial aos fatores que impactam diretamente a viabilidade financeira e operacional dessas frotas.

Entre os principais fatores estão os custos de aquisição, manutenção e operação, que variam de acordo com a tecnologia empregada, nos últimos anos, alternativas como o GNV e os veículos elétricos têm ganhado destaque como

soluções promissoras para reduzir custos e emissões, ainda que apresentem desafios específicos em termos de infraestrutura, durabilidade e investimento inicial.

Compreender essas variáveis é essencial para avaliar o retorno sobre o investimento e a competitividade dessas tecnologias no setor de transporte de carga.

6.1.3.1 Investimento inicial nos veículos

O preço de entrada para veículos elétricos pesados no Brasil é elevado. O modelo BYD eT18 21.250, lançado em 2024, tem preço sugerido de R\$ 589.000, sendo uma opção urbana competitiva para trajetos de curta distância (Portal Energia Limpa, 2025).

Já o Volkswagen e-Delivery 14-410 6x2, ano 2025, apresenta preço médio de R\$ 1.083.890 segundo a Tabela FIPE, destacando-se como um dos modelos elétricos mais robustos com 14 toneladas de PBT (Placa FIPE, 2025).

Tabela Fipe de 2025 mostra que o caminhão Scania G-460 A 6x2 CNG 2p (GNV)(E6), ano 2025, está com valor de R\$ 1.024.930,00 em maio. Esse preço vem caindo nos últimos meses — em dezembro de 2024, por exemplo, ele estava acima de R\$ 1.071.000,00. Comparando com o valor de tabela do modelo zero km no final de 2024, que era de cerca de R\$ 1.310.124,00, a desvalorização já passa de 21%. Ou seja, para quem está pensando em comprar ou vender esse modelo, vale a pena ficar de olho nas variações do mercado e avaliar bem o custo-benefício. (Placa FIPE, 2025).

No mercado europeu, o Mercedes-Benz eActros 600 custa aproximadamente €400.000, ou cerca de R\$ 2.200.000, valor que representa quase o dobro de um caminhão equivalente a diesel (EV Motorwatt, 2024). Além disso, segundo Silva (2022) o custo das baterias está em queda: passou de US\$ 1000 por kWh em 2010 para US\$ 227 em 2018. Projeções indicam que o preço poderá chegar a US\$ 120 em 2025 e US\$ 75 em 2030, impactando positivamente o custo total dos veículos.

Os veículos a GNV destacam-se pelo custo inicial mais acessível quando comparados aos veículos elétricos, o que torna essa tecnologia atraente para empresas que buscam modernizar suas frotas sem altos investimentos iniciais. Por exemplo, o Iveco Stralis 400 NP LNG Retarder 2017 está disponível por

aproximadamente €13.400, o equivalente a R\$ 83.918, mesmo considerando seu uso prévio e quilometragem elevada (Truck1, 2024).

Para Zarzur (2005) além do preço mais baixo, a tecnologia GNV apresenta uma curva de aprendizado e implantação já consolidada, com uma rede de manutenção e abastecimento mais estabelecida, sobretudo em grandes centros urbanos. Isso significa que as empresas podem implementar veículos a GNV com menor risco operacional inicial, aproveitando a estrutura existente.

Apesar disso, Marques (2018) comenta que o investimento em infraestrutura para a manutenção adequada dos cilindros, válvulas e sistemas de compressão é um aspecto que merece atenção. A segurança no armazenamento do gás e a conformidade com as normas técnicas brasileiras demandam investimentos contínuos em treinamento e atualização dos profissionais, o que pode agregar custos indiretos.

O Quadro 4 apresenta uma análise econômica da substituição do diesel por gás, indicando um investimento inicial de R\$ 1,2 milhão e uma economia anual estimada de R\$ 432 mil, resultando em um *payback* simples de 2,78 anos. O valor presente líquido (VPL) é de R\$ 847.627,92, com uma taxa interna de retorno (TIR) de 23,03% e horizonte de análise de 5 anos, considerando uma taxa de desconto de 12% ao ano, o que demonstra a viabilidade econômica da conversão para o gás nesse cenário

Quadro 4 – Análise Econômica da Substituição do Diesel por Gás

| Investimento Inicial | R\$ 1.200.000,00 |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Economia Anual Estimada | R\$ 432.000,00 |
| <i>Payback</i> Simples | 2,78 anos |
| Valor Presente Líquido (VPL) | R\$ 847.627,92 |
| Taxa Interna de Retorno (TIR) | 23,03% |
| Horizonte de Análise | 5 anos |
| Taxa de Desconto | 12% ao ano |

Fonte: Adaptado de (Young & Mac-Knight, 2021)

6.1.3.2 Custo de Manutenção

A manutenção dos veículos elétricos como observado no documento técnico da CETESB (2020) é amplamente reconhecida por sua simplicidade e baixo custo relativo, especialmente em comparação com veículos movidos a combustão ou GNV. A ausência de sistemas complexos como câmbio, embreagem e escapamento, além da redução drástica do número de peças móveis, contribui para diminuir tanto o tempo de parada para manutenção quanto os custos associados.

Os ônibus elétricos testados pela CETESB demonstraram uma redução de até 50% nos custos de manutenção, resultado da menor necessidade de trocas de óleo, filtros e reparos mecânicos convencionais. A regeneração da energia na frenagem não só aumenta a eficiência energética como também reduz o desgaste das pastilhas e discos de freio, estendendo a vida útil desses componentes.

Outra vantagem significativa é a maior previsibilidade da manutenção preventiva. Com a utilização de sensores e sistemas de telemetria, é possível monitorar em tempo real o estado dos componentes eletrônicos e das baterias, antecipando falhas e evitando quebras inesperadas. Isso aumenta a disponibilidade operacional dos veículos, aspecto fundamental para operações comerciais (Neiva, 2019).

Por outro lado, a manutenção de veículos elétricos exige equipes especializadas, especialmente para lidar com os sistemas de alta tensão e baterias de íons de lítio. O manejo inadequado pode apresentar riscos elétricos, por isso a capacitação técnica contínua é essencial para garantir a segurança e a qualidade do serviço (CETESB, 2020).

A Tabela 2 apresenta os custos e prazos estimados para a implantação da infraestrutura de carregamento de veículos elétricos, considerando diferentes categorias. Para o cliente final, os carregadores variam de 50 kW a 350 kW, com valores que podem chegar a US\$ 216 mil e prazos de 3 a 10 meses, enquanto na rede de distribuição, itens como transformadores e medidores têm custos entre US\$ 1,2 mil e US\$ 175 mil, com prazos de até 8 meses.

Nos alimentadores e subestações, os investimentos são maiores, podendo ultrapassar US\$ 35 milhões, com prazos que variam de 12 a 48 meses, o que evidencia os desafios financeiros e de tempo para ampliar a infraestrutura elétrica necessária à mobilidade elétrica.

Tabela 2 – Custo médio implementação estrutura de carregamento elétricos

| Categoria do componente | Atualização necessária | Custo | Tempo de implementação (mês) |
|-------------------------|--|---|------------------------------|
| Cliente final | Carregador rápido de 50 kW | Aquisição por plug: US\$ 20 k – 36 k Instalação por plug: US\$ 10 k – 46 k | 3 – 10 |
| | Carregador rápido de 150 kW | Aquisição por plug: US\$ 75 k – 100 k Instalação por plug: US\$ 19 k – 48 k | |
| | Carregador rápido de 350 kW | Aquisição por plug: US\$ 128 k – 150 k Instalação por plug: US\$ 26 k – 66 k | |
| | Instalação de medidor | US\$ 1,2 k – 5 k | |
| Rede de distribuição | Instalação de transformador de distribuição (+200 kW de carga) | Aquisição: US\$ 12 k – 175 k | 3 – 8 |
| Alimentadores | Instalação/Atualização do alimentador (+5 MW de carga) | US\$ 2 – 12 milhões | 3 – 12 |
| | Disjuntores associados ao sistema | ~US\$ 400 k | 6 – 12 |
| Subestações | Atualização em subestações (3 a 10 MW) | US\$ 3 – 5 milhões | 12 – 18 |
| | Instalação de novas subestações (3 a 10 MW) | US\$ 4 – 35 milhões | 24 – 48 |

Fonte: Silva (2022)

Revisado por Filho (2006) os veículos a GNV, embora apresentem menores emissões e alguns ganhos operacionais em relação aos motores a diesel, possuem um sistema mecânico que ainda demanda manutenção frequente e especializada. A presença de cilindros pressurizados, reguladores de pressão, válvulas e sistemas de injeção específicos exige um cuidado constante para garantir a segurança e o desempenho adequado do veículo.

A queima mais limpa do gás natural reduz o acúmulo de resíduos no motor, o que pode prolongar a vida útil dos componentes internos. Contudo, o motor ainda possui as mesmas partes móveis dos veículos a combustão interna, como pistões,

válvulas e sistemas de lubrificação, que precisam ser inspecionados e mantidos regularmente (MANUAL SCANIA GNV, 2023).

Estudos de Young & Mac-Knight (2021) indicam que motores a GNV podem operar até 16.000 km entre manutenções, comparado aos 12.000 km típicos dos motores a diesel. Além disso, o custo direto da manutenção por quilômetro rodado é menor, ficando em torno de R\$ 0,18 para GNV contra R\$ 0,25 para diesel, o que representa uma economia próxima de 28%.

A manutenção de sistemas de alta pressão e os componentes eletrônicos específicos para controle do gás exigem técnicos qualificados, aumentando a complexidade do serviço. Por essa razão, a segurança é um ponto crítico e o cumprimento rigoroso das normas técnicas brasileiras é fundamental para evitar acidentes (COSTA & PRADO, 2004).

Já para Costa (2016), apesar dessas exigências, a familiaridade das oficinas com motores a combustão facilita a manutenção dos veículos a GNV em relação aos veículos elétricos, especialmente em regiões onde a tecnologia elétrica ainda não está consolidada.

6.1.3.3 Custo Operacional Geral

Novamente avaliando o bom trabalho de Silva (2022) o consumo energético diário de caminhões elétricos varia entre 114 e 365 kWh, dependendo da operação. Empresas estão adotando subestações já existentes, o que minimiza a necessidade de grandes investimentos imediatos em infraestrutura. O e-Delivery da Volkswagen percorre até 250 km com motor de 300 kW e recuperação de até 40% da energia durante frenagens.

Além disso, há uma significativa redução ambiental: até 70% menos emissões de gases de efeito estufa em comparação ao diesel, mesmo considerando o impacto da fabricação das baterias.

O custo de recarga também é relevante. Carregadores de 50 kW custam entre US\$ 20.000 e US\$ 36.000, enquanto os de 350 kW podem ultrapassar US\$ 150.000. Subestações novas variam de US\$ 4 a 35 milhões, dependendo da escala.

A Tabela 3 apresenta uma comparação do custo operacional entre os modelos VW Delivery 11.180 a diesel e VW E-Delivery 11 elétrico, com base em dados de dezembro de 2023. Apesar do maior investimento inicial no modelo elétrico (R\$ 785.856,00 contra R\$ 368.700,00), ele apresenta menor custo por km rodado (R\$ 1,73 contra R\$ 2,37) e menores custos de manutenção mensal (R\$ 1.283,00 frente a R\$ 2.333,00). O modelo elétrico também tem menor custo por tonelada transportada (R\$ 27,37 contra R\$ 31,76), embora sua autonomia e carga útil sejam inferiores.

A tabela destaca o custo do diesel (R\$ 6,12/l) e da energia elétrica (R\$ 1,13/kWh), reforçando a economia operacional do veículo elétrico mesmo diante de um custo de aquisição mais elevado.

Tabela 3 – Análise Custo Operacional Diesel x Elétrico

| Data da análise: 13/12/2023 | VW Delivery 11.180 01/2023 | VW E-Delivery 11 01/2023 |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| Preço | R\$ 368.700,00 | R\$ 785.856,00 |
| Consumo Urbano | 4,8 Km/l | 1,64Km/KW |
| Consumo Rodoviário | 8,2 Km/l | 1,13Km/KW |
| Autonomia Urbana | 440Km | 250Km |
| Autonomia Rodoviária | 640Km | 210Km |
| Custo km Rodado | R\$ 2,37 | R\$ 1,73 |
| Depreciação/Valorização | -0,04% | 13% |
| Custo manutenção/mês | R\$ 2.333,00 | R\$ 1.283,00 |
| Carga útil | 7.450Kg | 6.320Kg |
| Custo Ton. Transportada | R\$ 31,76 | R\$ 27,37 |
| IPVA 2023 | R\$ 5.530,50 | R\$ 11.787,84 |

| | |
|----------------|----------|
| Diesel: | R\$ 6,12 |
| KW/h: | R\$ 1,13 |

Fonte: Baldessin et al. (2024)

Apesar do alto investimento inicial, o custo operacional por km tende a ser menor do que o diesel. Combinando economia de energia e menor manutenção, o retorno pode acontecer em 5 a 10 anos, especialmente em operações urbanas (DNIT, 2021).

Conforme Young & Mac-Knight (2021) estudos apontam que ônibus a diesel têm custo de R\$ 2,69/km, enquanto os a GNV operam a R\$ 2,02/km. Isso representa economia de R\$ 0,67 por km, altamente relevante para frotas que percorrem longas distâncias diariamente.

Projetando-se essa economia em uma frota com 1.000 veículos rodando 75.000 km por ano, chega-se a uma economia anual de R\$ 50 milhões. Essa previsibilidade é acentuada pela estabilidade do preço do GNV frente ao diesel.

6.1.4 Conclusão Panorama Geral Rodoviários

A análise detalhada entre veículos pesados movidos a eletricidade e a GNV evidencia que ambas as tecnologias representam avanços relevantes em relação aos combustíveis fósseis convencionais, cada uma com suas vantagens e limitações, o GNV continua sendo uma alternativa economicamente viável e ambientalmente mais amigável do que o diesel, sobretudo em regiões onde há infraestrutura disponível. Por outro lado, os veículos elétricos vêm se consolidando como uma solução inovadora, alinhada às metas globais de descarbonização e eficiência energética. Essa comparação transcende os custos operacionais, abrangendo também aspectos técnicos, estruturais, ambientais e de segurança.

Do ponto de vista técnico, os veículos elétricos apresentam uma arquitetura mais simplificada, com a ausência de componentes como câmbio, embreagem e escapamento, o que reduz a complexidade mecânica e as demandas por manutenção. Essa estrutura mais enxuta diminui o número de falhas potenciais e promove maior confiabilidade no desempenho ao longo do tempo. Além disso, os motores elétricos são notoriamente mais eficientes podendo alcançar até três vezes o rendimento dos motores a combustão interna, o que garante vantagens operacionais significativas.

A segurança também é um ponto forte da tecnologia elétrica. A eliminação do uso de combustíveis inflamáveis sob pressão reduz os riscos de explosões em colisões ou falhas estruturais. Os sistemas de monitoramento eletrônico, que controlam em tempo real variáveis como tensão, corrente e temperatura, oferecem maior controle e estabilidade operacional. Outro benefício evidente é a operação

silenciosa, que contribui para a redução da poluição sonora em centros urbanos e torna os veículos elétricos mais adequados para entregas noturnas e operações sensíveis ao ruído. A presença de frenagem regenerativa, por sua vez, permite o reaproveitamento da energia cinética, aumentando a eficiência energética e prolongando a vida útil dos sistemas de frenagem.

Em contrapartida, a adoção do GNV exige uma estrutura de abastecimento mais complexa, envolvendo cilindros de alta pressão, compressores e protocolos específicos de segurança. Apesar disso, o custo por quilômetro rodado é competitivo, tornando a tecnologia atrativa para frotas com rotas bem definidas e infraestrutura acessível. A principal limitação reside na distribuição geográfica dos postos de abastecimento, o que restringe sua aplicabilidade em regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos. Além disso, o sistema mecânico dos veículos a GNV mantém-se próximo ao dos veículos a combustão, o que implica maior desgaste de peças e necessidade de manutenções técnicas especializadas com maior frequência.

Mesmo com um investimento inicial mais baixo e maior familiaridade tecnológica, os modelos a GNV ainda possuem eficiência energética inferior aos elétricos, o que afeta sua competitividade em cenários de longo prazo. Já os veículos elétricos, embora mais caros na aquisição e ainda dependentes de avanços em autonomia e rede de recarga, vêm evoluindo rapidamente em termos de desempenho, disponibilidade e custo operacional.

O Quadro 5 foi elaborado com base nas fontes consultadas ao longo do capítulo dedicado ao transporte rodoviário de carga e busca oferecer uma comparação econômica clara entre as tecnologias analisadas. O quadro aborda pontos como custo de aquisição, impacto ambiental, manutenção, operação, tempo de retorno do investimento e autonomia. Verificou-se, por exemplo, que enquanto os veículos elétricos apresentam maior custo inicial e menor autonomia, variando entre 200 e 330 quilômetros, eles oferecem menor impacto ambiental e menores custos operacionais e de manutenção, já os veículos a GNV, com custo de aquisição menor e autonomia equiparada ao diesel, exigem menor investimento em infraestrutura inicial, enfrentam maior frequência de manutenção e uma rede de abastecimento ainda limitada.

Diante de todas essas análises, torna-se evidente que ainda não existe uma solução única e ideal para o transporte pesado de cargas no contexto atual, o cenário

exige a consideração de múltiplos fatores, como infraestrutura disponível, tipo de aplicação, distância percorrida, custos de operação e metas ambientais. No entanto, as tecnologias avaliadas eletricidade e GNV demonstram caminhos promissores e complementares, contribuindo para a diversificação da matriz energética do transporte e oferecendo alternativas reais para uma mobilidade mais sustentável. Assim, o estudo permitiu explorar boas possibilidades, aplicadas de forma estratégica e regionalizada, representando importantes avanços na transição energética do setor.

Quadro 5 – Comparação Econômica: Veículos Pesados Elétricos vs. GNV

| Critério | Veículo Elétrico | Veículo GNV |
|---------------------|--|---|
| Custo de Aquisição | De R\$ 589.000 (BYD eT18) até R\$ 2.200.000 (Mercedes eActros 600) | R\$ 83.918 (Stralis 400 NP, usado 2017) |
| Custo de Manutenção | Redução de até 50% em relação ao diesel | Redução de 30% comparado ao diesel |
| Custo Operacional | Menor custo por km com eletricidade; estimativas indicam 114–365 kWh/dia | R\$ 2,02/km, contra R\$ 2,69/km do diesel (economia de R\$ 0,67/km) |
| Infraestrutura | Carregadores de 50 a 350 kW: US\$ 20 mil a US\$ 150 mil | Infraestrutura mais simples; depende de estações de abastecimento GNV |
| | Subestações novas: US\$ 4 a 35 milhões | Requer capacitação para manutenção específica (compressão e válvulas) |
| Payback Estimado | Entre 5 e 10 anos, depende do uso e escala | Aproximadamente 5 anos |
| Autonomia | 200–330 km por carga, conforme modelo | Sem impacto relevante similar à autonomia de modelos a diesel |
| Impacto Ambiental | Redução de até 70% nas emissões de GEE mesmo com produção de baterias | Emissões menores que o diesel, mas maiores que o elétrico |

Fonte: Autores, 2025

6.2 Comparativo no Segmento Agrícola

A análise comparativa entre tratores híbridos e elétricos no contexto da sustentabilidade agrícola revela avanços significativos, mas também desafios persistentes que precisam ser superados para uma adoção em larga escala. Ambos os modelos representam alternativas viáveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e promover a eficiência energética, cada um com suas particularidades e aplicações específicas, nesse contexto, os tratores híbridos e elétricos se destacam como alternativas viáveis à motorização convencional a diesel.

6.2.1 Vantagens e Desvantagens dos Tratores Elétricos

Os tratores totalmente elétricos representam uma proposta mais inovadora e limpa, especialmente no que se refere às emissões locais, que são nulas. As principais vantagens dos modelos elétricos incluem maior eficiência energética, operação silenciosa, baixa manutenção (devido à ausência de componentes como óleo e filtros), possibilidade de regeneração de energia e integração com fontes renováveis, como a energia solar.

A eletrificação completa permite um controle mais preciso da tração, da TDP e dos implementos, contribuindo para a eficiência operacional e a ergonomia do operador. Exemplos como o Fendt e107 V Vario e o New Holland T4 Electric Power demonstram grande potencial em tratores compactos, com autonomias variando de 4 a 8 horas conforme a carga de trabalho.

No entanto, essas máquinas ainda enfrentam desafios significativos quanto à autonomia limitada, densidade energética das baterias ainda é significativamente inferior à do diesel, o que implica em maior peso e volume, afetando o desempenho no campo e a compactação do solo; a infraestrutura de recarga é insuficiente em áreas rurais; e o alto custo inicial continua sendo um fator limitante, como o modelo Fendt elétrico custando até 80% a mais que sua versão a diesel.

Mesmo com melhorias nos sistemas de gestão térmica, regeneração de energia e carregamento rápido, a operação prolongada ainda depende de soluções

de armazenamento de grande capacidade, que elevam o custo e o peso total da máquina.

6.2.2 Vantagens e Desvantagens dos Tratores Híbridos

Os tratores híbridos surgem como uma alternativa estratégica diante das crescentes exigências por sustentabilidade na agricultura e da necessidade de reduzir o impacto ambiental das operações mecanizadas, seu princípio básico é a combinação de um motor de combustão interna com um ou mais sistemas elétricos de propulsão, promovendo uma sinergia entre desempenho e eficiência energética.

Entre as principais vantagens dos tratores híbridos está a capacidade de reduzir o consumo de combustível e, conseqüentemente, as emissões de gases de efeito estufa, a presença de uma unidade elétrica permite que o motor térmico opere em faixas mais eficientes, evitando desperdícios, principalmente durante variações de carga.

Além disso, a arquitetura híbrida oferece a possibilidade de regeneração de energia, como no caso da frenagem regenerativa, que permite a recuperação de parte da energia cinética. Outra vantagem importante é a redução no tamanho necessário do motor térmico, já que os picos de potência são atendidos pelo sistema elétrico, resultando em menor desgaste mecânico e menor demanda por manutenção.

A flexibilidade das arquiteturas híbridas também favorece sua adoção progressiva, configurações paralelas, por exemplo, permitem integrar o sistema híbrido ao projeto tradicional de tratores, com menores alterações estruturais. Já os sistemas híbridos em série possibilitam um desacoplamento total entre a rotação do ICE e os componentes mecânicos, como rodas e tomada de força, promovendo eficiência superior por meio de transmissões eletrificadas. Essas abordagens são particularmente úteis em tarefas que demandam diferentes faixas de potência, como transporte, preparo de solo ou pulverização.

No entanto, os tratores híbridos também apresentam desvantagens que limitam sua adoção em larga escala. O principal desafio é a complexidade de integração dos sistemas elétrico e mecânico, o que exige sofisticadas estratégias de gerenciamento de energia (Energy Management Strategy – EMS) para que a distribuição de potência

entre as fontes seja feita de forma eficiente. Além disso, os custos de desenvolvimento e produção ainda são elevados, tornando o investimento inicial significativamente superior ao de tratores convencionais, a densidade energética das baterias continua sendo uma limitação, embora em menor grau do que em tratores totalmente elétricos, e a necessidade de sistemas adicionais de resfriamento e controle térmico também aumenta a complexidade do projeto.

A robustez exigida para operação em ambientes rurais muitas vezes hostis e com presença de substâncias corrosivas e terrenos irregulares impõe exigências rigorosas aos sistemas embarcados. Isso implica em maiores cuidados no dimensionamento e na durabilidade dos componentes elétricos, especialmente em topologias como a híbrida em série, que requerem múltiplos conversores de potência e maior integração de software e sensores.

Modelos como o AUGA M1 e o New Holland T6 Methane Power exemplificam essas abordagens. O AUGA M1, que integra um motor a biometano com acionamento elétrico, é capaz de operar por até 12 horas contínuas, reduzindo em até 114 toneladas de CO₂ por ano em comparação com tratores a diesel.

Já o T6 Methane Power, alimentado por metano ou biometano, aproveita subprodutos agroindustriais e contribui para um ciclo produtivo mais sustentável, alcançando reduções de até 84% nas emissões, embora esses modelos superem algumas limitações dos tratores elétricos especialmente em operações prolongadas ou com alta demanda de potência, ainda dependem de combustíveis fósseis ou biocombustíveis, mantendo emissões residuais.

6.2.3 Panorama Geral

A análise comparativa entre tratores híbridos e elétricos no contexto da sustentabilidade agrícola evidencia avanços relevantes, mas também desafios que ainda precisam ser superados para uma adoção mais ampla. Ambos os modelos se apresentam como caminhos possíveis para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e aumentar a eficiência energética, cada um com características próprias e aplicações que podem se adequar a diferentes cenários.

Os tratores totalmente elétricos, como o Fendt e107 V Vario e o New Holland T4 Electric Power, eliminam as emissões locais de poluentes, proporcionam operação silenciosa e requerem menos manutenção. A eletrificação total ainda oferece maior controle sobre a tração, a tomada de potência (TDP) e os implementos, resultando em ganhos operacionais e melhores condições ergonômicas para o operador. Por outro lado, esses modelos ainda possuem custos iniciais mais elevados em relação aos equivalentes a combustão — o Fendt e107 V Vario, por exemplo, custa entre €196.000 e €220.000, enquanto a versão a diesel (207 V Vario) parte de aproximadamente €122.994, representando um acréscimo de 60% a 80% no investimento. Apesar disso, a análise do ciclo de vida sugere que a economia com combustível, manutenção e peças pode, em longo prazo, compensar parte desse investimento inicial.

Entretanto, a autonomia limitada, a densidade energética das baterias e a carência de infraestrutura de recarga em áreas rurais ainda impõem barreiras. Mesmo com avanços em gerenciamento térmico, regeneração de energia e carregamento rápido, a operação contínua de tratores elétricos depende de soluções de armazenamento mais eficientes, que tendem a aumentar custos e peso das máquinas.

Nesse contexto, os tratores híbridos surgem como uma alternativa intermediária, associando motores a combustão interna a sistemas elétricos de propulsão. Essa configuração proporciona maior flexibilidade operacional, otimiza o uso do motor térmico e pode reduzir o consumo de combustível, sobretudo em situações de pico de demanda. Apesar do custo inicial igualmente elevado, o retorno econômico no médio prazo pode ser viabilizado pela economia de combustível e pela mitigação dos impactos ambientais. Um exemplo é o T6 Methane Power, que apresentou redução de 47% nos custos operacionais em cinco anos. Outro caso é o AUGA M1, que combina eletricidade e biocombustíveis em um conceito alinhado à economia circular, indicando uma rota tecnológica promissora.

As perspectivas para o futuro da mecanização agrícola sugerem que não há um modelo único capaz de atender a todos os cenários. O avanço das tecnologias de armazenamento, a maior autonomia das baterias e a expansão da infraestrutura de recarga são fatores determinantes para a consolidação dos tratores elétricos, enquanto os híbridos devem continuar exercendo um papel relevante nessa transição, justamente por oferecerem um equilíbrio entre desempenho, autonomia e sustentabilidade.

Portanto, a escolha entre tratores híbridos ou elétricos deve considerar o contexto de cada propriedade, a infraestrutura disponível, o perfil produtivo e o orçamento de investimento. Mais do que indicar uma solução definitiva, os estudos atuais mostram que diferentes caminhos estão sendo explorados para tornar a agricultura mais limpa, eficiente e ambientalmente responsável, ainda que o avanço ocorra de forma gradual.

6.3 Comparativo no Segmento Mineração

A mineração é uma das atividades industriais mais intensivas em consumo energético e emissões de carbono, especialmente devido ao uso predominante de combustíveis fósseis, como o diesel, em veículos pesados, torna-se essencial a avaliação de tecnologias alternativas que possam aliar eficiência operacional à redução dos impactos ambientais.

A substituição do diesel por fontes limpas, como o hidrogênio verde, desponta como uma das principais soluções sustentáveis para promover essa transição, a adoção dessa tecnologia não apenas reduz significativamente as emissões diretas de gases de efeito estufa, mas também contribui para o avanço de uma matriz energética mais limpa dentro do setor.

A análise da “propulsão verde” em veículos de mineração permite compreender os potenciais ganhos ambientais e energéticos, bem como os desafios técnicos e econômicos envolvidos, considerando fatores como consumo de combustível por quilômetro rodado, emissões de CO₂, eficiência energética e viabilidade de implementação em larga escala, é possível identificar cenários promissores para a substituição progressiva do diesel.

Ao mesmo tempo, a necessidade de desenvolvimento de infraestrutura, redução de custos e adequação tecnológica mostra que essa transição exige planejamento estratégico e investimentos contínuos, assim, a mineração encontra-se em um ponto de inflexão, no qual decisões orientadas à sustentabilidade podem redefinir o futuro da indústria.

6.3.1 Impactos Ambientais

Apesar de representarem apenas 3,6% do valor total do comércio automotivo mundial, os veículos pesados têm um impacto significativo nas emissões de CO₂, que aumentaram mais de 30% desde o ano 2000, sendo que os caminhões são responsáveis por cerca de 80% desse crescimento. esses veículos também exercem um papel relevante na degradação ambiental, respondendo por mais de 40% das emissões de óxidos de nitrogênio nas rodovias, mais de 60% das partículas finas e mais de 20% da emissão de fumaça preta, conforme aponta o mais recente relatório do PNUMA.

O relatório intitulado Veículos Pesados Usados e o Meio Ambiente – Uma Perspectiva Global dos Veículos Pesados Usados: Fluxo, Escala e Regulamentação, elaborado em parceria entre o PNUMA e a Coalizão Clima e Ar Limpo (CCAC), apresenta uma análise abrangente da ONU sobre o impacto global dos veículos pesados usados.

A publicação aborda a relação desses veículos com a poluição atmosférica, o aumento nos acidentes de trânsito, o consumo de combustível e a elevação das emissões que afetam o clima, e propõe estratégias para mitigar os efeitos negativos à saúde pública e ao meio ambiente causados por esse tipo de frota.

Segundo o estudo, espera-se que a quantidade de veículos pesados continue crescendo de forma significativa, impulsionada pela expansão das atividades econômicas e pela crescente demanda por transporte de pessoas e mercadorias. Essa tendência se apoia em dados históricos, como a duplicação das vendas globais de caminhões e ônibus entre 2000 e 2015.

Muitos países em desenvolvimento recorrem à importação de veículos pesados usados como alternativa para expandir suas frotas a um custo mais acessível. No entanto, o relatório revela que a regulamentação e a fiscalização da qualidade desses veículos são, em grande parte, ausentes ou ineficazes, essa deficiência contribui para o agravamento de seus impactos, especialmente quando se trata de veículos antigos, com altos níveis de emissão de poluentes e condições de segurança precárias.

Até o momento, não há exigências internacionais mínimas para a exportação de veículos pesados usados, o estudo observa que mais da metade dos países que

importam esses veículos possui normas classificadas como “fracas” ou “muito fracas”, com aplicação insuficiente. Como exemplo, embora 25 nações africanas tenham adotado diretrizes voltadas à redução da poluição, mitigação climática e melhoria da segurança viária, apenas quatro colocaram essas medidas em prática de forma plena, globalmente, apenas dois países contemplam os veículos usados em seus compromissos climáticos nacionais.

O uso do hidrogênio verde como alternativa energética no setor de mineração tem se mostrado uma estratégia promissora para reduzir as emissões de carbono em uma atividade tradicionalmente marcada por altos níveis de poluição, quando comparado aos combustíveis fósseis, como o diesel, o hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis possibilita uma expressiva diminuição na emissão de gases de efeito estufa.

Na prática, um caminhão de grande porte utilizado na mineração pode consumir cerca de 3.000 litros de diesel por dia, o que representa, aproximadamente, 8 toneladas de CO₂ lançadas na atmosfera diariamente, com base em um fator médio de emissão de 2,68 kg de CO₂ por litro de diesel, conforme apontado pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). Ao substituir esse consumo por hidrogênio verde, cujas emissões diretas no uso são nulas com o único subproduto sendo vapor d'água, é possível evitar cerca de 2.920 toneladas de CO₂ por caminhão por ano.

É fundamental considerar o ciclo de vida completo dessa tecnologia, a produção de hidrogênio verde requer eletricidade proveniente de fontes renováveis, além de volumes significativos de água para o processo de eletrólise, em média, são necessários 9 litros de água para cada quilograma de hidrogênio produzido. Os equipamentos associados, como eletrolisadores e células a combustível, demandam materiais críticos como platina, irídio e membranas poliméricas, cuja extração e descarte devem ser gerenciados de forma sustentável para evitar impactos negativos indiretos.

Apesar desses desafios, estudos apontam que, mesmo considerando todas as etapas do ciclo de vida, o hidrogênio verde pode representar uma redução de até 85% nas emissões totais em comparação ao diesel, desde que produzido com energia 100% renovável e em regiões com gestão hídrica adequada. Em síntese, a adoção do hidrogênio verde na mineração é uma solução viável e eficaz para a transição

energética do setor, desde que acompanhada por planejamento estratégico, uso racional de recursos e investimento em infraestrutura tecnológica e ambientalmente responsável.

6.3.2 Desafios Econômicos

O hidrogênio verde vem se consolidando como uma das alternativas mais promissoras para a descarbonização de setores intensivos em emissões, como transporte pesado e mineração, entretanto, sua viabilidade econômica ainda é frequentemente comparada ao diesel, combustível fóssil amplamente utilizado.

A produção de hidrogênio pode ser classificada em três categorias principais, cinza, azul e verde, de acordo com a fonte de energia utilizada e o nível de emissões de carbono geradas durante o processo, cada tipo apresenta particularidades em termos de impacto ambiental e viabilidade econômica, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Comparação de custo e emissões na produção de Hidrogênio

| Tipo de Hidrogênio | Faixa de Custo (US\$/kg) | Emissões de CO ₂ (kg por kg H ₂) | Características Principais |
|--------------------|--|---|---|
| Cinza | 0,50 – 1,70 | ~10 kg CO ₂ /kg H ₂ | Mais barato, porém altamente poluente |
| Azul | 1,00 – 3,50 | 1 – 3 kg CO ₂ /kg H ₂ | Emissões reduzidas com CCS, custo intermediário |
| Verde | 3,00 – 8,00 (global) 1,25 – 1,90 (Brasil) | 0 kg CO ₂ /kg H ₂ | Produção limpa com fontes renováveis, custo em queda com avanços tecnológicos |

Fonte: Adaptado de IEA, 2022

De acordo com a IEA (2022), o chamado hidrogênio cinza é obtido a partir do gás natural, sem a aplicação de tecnologias de captura de carbono, por ser um processo mais simples e amplamente difundido, apresenta os menores custos de produção, oscilando entre US\$ 0,50 e US\$ 1,70 por quilograma.

Essa vantagem econômica vem acompanhada de um impacto ambiental significativo, já que a produção de um quilo de hidrogênio pode resultar na emissão de cerca de 10 kg de CO₂, configurando-se como a opção com maior pegada de carbono entre as alternativas disponíveis.

O hidrogênio azul, por sua vez, também tem origem no gás natural, porém com a inclusão de tecnologias de captura e armazenamento de carbono, que reduzem substancialmente a liberação de CO₂ na atmosfera, com isso, as emissões variam de 1 a 3 kg de CO₂ por quilograma produzido. Os custos associados a essa tecnologia estão entre US\$ 1,00 e US\$ 3,50 por quilo, dependendo da eficiência do sistema de captura e das condições do mercado de gás, por esse motivo, o hidrogênio azul é frequentemente considerado uma solução intermediária entre os métodos convencionais e as rotas sustentáveis, conforme dados da IEA (2022).

Já o hidrogênio verde é produzido por meio da eletrólise da água, utilizando exclusivamente eletricidade proveniente de fontes renováveis, como energia solar e eólica. Esse processo não gera emissões diretas de CO₂, sendo classificado como ambientalmente mais limpo, apesar de seus benefícios ambientais, o custo global de produção ainda é elevado, variando entre US\$ 3,00 e US\$ 8,00 por quilograma, no entanto, o Brasil possui condições excepcionais para a redução desses custos, especialmente pela oferta abundante de energia renovável, com destaque para a região Nordeste, estimativas da consultoria McKinsey indicam que o país poderá atingir valores entre US\$ 1,50 e US\$ 1,90 por quilo até 2030, com potencial de queda para US\$ 1,25 até 2040.

Essas estimativas indicam que o Brasil poderá se tornar um dos países mais competitivos na produção de hidrogênio verde, contribuindo significativamente para a transição energética global. No entanto, para alcançar esse potencial, será necessário enfrentar desafios como a expansão da infraestrutura, a redução do custo dos eletrolisadores e a criação de políticas públicas que incentivem a adoção em larga escala.

O preço do diesel no Brasil tem variado significativamente em 2025, influenciado por fatores econômicos e geopolíticos. Em janeiro, a Petrobras elevou o preço em R\$ 0,22 por litro, alcançando R\$ 3,72/litro, a medida foi amplamente

noticiada por veículos de imprensa, como a CNN Brasil e a Agência Brasil, em abril, foi anunciada uma redução de 4,6%, fixando o preço médio em torno de R\$ 3,55/ litro.

Considerando que um litro de diesel pesa cerca de 0,832 kg, o custo por quilograma situa-se entre R\$ 4,26 e R\$ 4,47, o que corresponde a US\$ 0,83 a US\$ 0,88, com base na cotação média do dólar em R\$ 5,13. Apesar de o diesel ainda ser mais barato que o hidrogênio verde por quilograma, ele possui uma pegada de carbono significativamente mais elevada.

O Quadro 6 elaborado por nós conta a base nos trabalhos e fontes científicas analisadas na seção de mineração, a comparação de um veículo pesado de mineradora em um ano de funcionamento no Diesel e na Célula a combustível de Hidrogênio.

Quadro 6 – Comparação em um ano de um Veículo pesado de mineradora

| Parâmetro | Diesel | Hidrogênio Verde |
|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| Consumo médio | 0,3–0,5 km por litro | 0,3–0,4 km por kg |
| Custo médio | US\$ 0,88 por litro | US\$ 3,00 – US\$ 8,00 por kg |
| Consumo Anual | ~140.000 litros | ~30.000 kg de H ₂ |
| Custo anual de combustível | US\$ 123.200 | US\$ 90.000– 240.000 |
| Emissões de CO ₂ | ~2.400 toneladas | 0 toneladas |
| Energia consumida | ~32.400.000 MJ | ~45.760.000 MJ |
| Manutenção | Alta | Moderada |
| Infraestrutura | Consolidada | Em desenvolvimento |

Fonte: Elaboração Própria, 2025

6.3.3 Eficiência Energética

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante no universo e ocupa a terceira posição em quantidade na crosta terrestre, indicando sua ampla disponibilidade. Ele figura como o primeiro elemento na tabela periódica e seu gás é formado por moléculas de hidrogênio, apresentando uma densidade aproximadamente 14,4 vezes inferior à do ar, o que o torna o elemento mais leve existente na natureza, segundo aponta (GIZ, 2021).

Uma das principais vantagens do hidrogênio está em seu elevado potencial energético, especialmente quando comparado a combustíveis fósseis tradicionais, como a gasolina e o diesel. Para se ter uma ideia, o poder calorífico inferior do hidrogênio gira em torno de 33 kWh por quilograma, enquanto o diesel apresenta, cerca de 13 kWh/kg.

Isso significa que, em termos de conteúdo energético, 1 kg de hidrogênio equivale a quase três vezes o valor energético contido em 1 kg de diesel. A Tabela 5 apresenta uma comparação entre o PCI de alguns tipos de combustíveis.

Tabela 5 – Comparação dos PCI de combustíveis

| Combustíveis | Poder Calorífico Inferior (kWh/kg) |
|---------------------|---|
| Hidrogênio | 33 |
| Gás natural | 13 |
| Gasolina | 12 |
| Diesel | 12 |
| Etanol | 7 |

Fonte: Leão, 2023

No entanto, suas propriedades físico-químicas também impõem desafios técnicos, sua densidade volumétrica, sob condições ambientais normais, é de aproximadamente 0,0899 g/L, é um valor extremamente baixos, segundo Leão (2023),

seus pontos de fusão e ebulição são bastante reduzidos, o que exige métodos especializados tanto para o transporte quanto para o armazenamento seguro do gás.

O hidrogênio não se destaca apenas como vetor energético, mas também pode ser utilizado diretamente como combustível, ele pode ser obtido em sua forma pura ou em misturas com outros gases, tanto por meio de processos industriais quanto pela extração de fontes naturais.

No Brasil, já foram identificadas reservas naturais de hidrogênio em pelo menos quatro estados: Minas Gerais, Tocantins, Roraima e Ceará. A exploração dessas fontes naturais, atualmente em fase de pesquisa, representa uma oportunidade promissora, especialmente por se tratar de uma alternativa mais econômica à produção industrial do gás.

6.3.4 A implementação do hidrogênio no setor de mineração

O uso do hidrogênio verde na indústria da mineração vem se destacando como uma solução estratégica para a redução das emissões de carbono em um setor tradicionalmente vinculado ao consumo intensivo de combustíveis fósseis, a substituição do diesel por hidrogênio gerado a partir de fontes renováveis permite uma queda expressiva nas emissões de gases de efeito estufa, além de promover maior eficiência energética nas atividades operacionais. Essa iniciativa contribui diretamente para o alinhamento do setor às metas internacionais de sustentabilidade e à transição para uma matriz energética de baixo carbono, outro ponto relevante é o papel do hidrogênio como vetor de armazenamento de energia, proporcionando maior confiabilidade e equilíbrio às redes elétricas, especialmente em áreas isoladas ou sujeitas à intermitência na geração de energia renovável.

O consumo energético e as emissões de gases poluentes por caminhões de mineração variam significativamente conforme a tecnologia utilizada, os caminhões movidos a diesel, amplamente utilizados em operações de grande porte, apresentam

um consumo médio de aproximadamente 0,3 a 0,5 km por litro, o que equivale a 2 a 3,3 litros de diesel por quilômetro rodado.

Conforme dados apresentados no site da Caterpillar, seus veículos pesados, como o Caterpillar 797F, um dos maiores do setor, podem consumir entre 130 e 150 litros de diesel por hora, resultando em um gasto médio de cerca de 2,5 litros por quilômetro, especialmente em trajetos com carga total e terrenos acidentados, considerando o fator de emissão de 2,68 kg de CO₂ por litro de diesel queimado, um caminhão desse tipo pode liberar mais de 6,7 kg de CO₂ por quilômetro rodado.

Em contraste, os caminhões de mineração movidos a hidrogênio verde, tecnologia ainda em fase de expansão, consomem em média 0,3 a 0,4 km por kg de hidrogênio, ou seja, 2,5 a 3,3 kg de hidrogênio por quilômetro, essa estimativa se baseia em modelos experimentais e comerciais como o caminhão da Anglo American, desenvolvido especificamente para uso em mineração pesada. Apesar de um consumo energético maior em termos de Mj por quilômetro, esses veículos têm a vantagem de não emitirem CO₂ durante a operação, representando uma alternativa mais limpa para o setor.

Enquanto a infraestrutura para o abastecimento e operação de caminhões a diesel é consolidada, a do hidrogênio verde ainda está em desenvolvimento, no entanto, considerando as metas de descarbonização da indústria mineral e os avanços em tecnologias limpas, os caminhões a hidrogênio se apresentam como uma solução promissora para reduzir a pegada de carbono da mineração no médio e longo prazo.

Diversos exemplos ao redor do mundo demonstram o potencial dessa tecnologia, um dos casos mais emblemáticos é o da *Anglo American*, que desenvolveu o maior caminhão de mineração movido a hidrogênio do mundo, como parte do projeto nuGen™, na mina de platina Mogalakwena, na África do Sul.

O caminhão, um Komatsu 930E-4 adaptado, conforme visto na Figura 99, combina célula de combustível de hidrogênio com bateria de íons de lítio, totalizando uma potência de 2 megawatts, suficiente para transportar até 290 toneladas de minério, essa inovação tem potencial para reduzir até 80% das emissões associadas ao uso de diesel nas operações da empresa.

Figura 99 – Caminhão movido a hidrogênio da usado pela Anglo American



Fonte: Anglo American, 2022

Outras gigantes do setor também estão investindo em soluções baseadas em hidrogênio, a Komatsu e a General Motors anunciaram uma parceria para desenvolver um novo modelo de caminhão de mineração equipado com a célula de combustível *HYDROTEC*, conforme apresentado em seu site, buscando criar uma alternativa com zero emissões para transporte de cargas pesadas.

Na China, a XCMG revelou o desenvolvimento de um caminhão de 240 toneladas movido a hidrogênio, programado para operar testes no Brasil no começo do segundo semestre de 2025, conforme notícia publicada no Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM) em 2025. Já a *Fortescue Metals Group*, na Austrália, está conduzindo testes com escavadeiras elétricas a hidrogênio e desenvolvendo veículos de transporte pesado movidos por essa fonte energética, como parte de um plano de US\$ 6 bilhões para eliminar as emissões de suas operações até 2030.

Essas iniciativas evidenciam os potenciais benefícios do uso do hidrogênio no setor mineral, como a eliminação de emissões diretas de CO₂, maior eficiência em operações remotas e o aproveitamento de excedentes de energia solar e eólica para sua produção por eletrólise.

Por outro lado, a transição apresenta desafios relevantes, incluindo o elevado custo de produção do hidrogênio verde, ainda superior ao do diesel, a necessidade de investimentos em infraestrutura para transporte e armazenamento, além das adaptações técnicas exigidas em equipamentos pesados.

Mesmo com essas barreiras, as perspectivas são promissoras. O avanço tecnológico, o aumento da escala de produção e os incentivos à descarbonização industrial podem reduzir gradualmente o custo do hidrogênio verde. Nesse contexto, a mineração surge como um setor com potencial para testar diferentes soluções energéticas sustentáveis, entre as quais o hidrogênio verde se destaca como um caminho possível, mas não exclusivo, na transformação energética global.

6.4 Conclusão final com análise de todos os cenários

Este trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade e a aplicação de alternativas sustentáveis de propulsão para veículos extrapesados nos segmentos rodoviário, agrícola e de mineração. A partir de uma abordagem técnica, histórica e econômica, e considerando também a experiência prática dos autores e do professor orientador, foi possível construir um panorama amplo das tecnologias que podem moldar, em conjunto, o futuro mais sustentável da mobilidade pesada.

Segmento rodoviário. Observou-se que os veículos elétricos a bateria vem ganhando relevância como um dos caminhos mais promissores para aplicações de média e longa perspectiva temporal, especialmente em operações urbanas e de curta a média distância. Persistem desafios de autonomia e infraestrutura de recarga, mas a rápida evolução das baterias, dos sistemas de regeneração e da oferta comercial (por exemplo: VW e-Delivery, Mercedes-Benz eActros, Volvo FH Electric) reforçam o potencial de redução de emissões de CO₂, NO_x e particulados. Em cenários adequados, custos operacionais menores, manutenção simplificada e incentivos

ambientais podem fortalecer a atratividade econômica da eletrificação; contudo, resultados dependem do perfil de uso e das condições locais de energia e logística.

Segmento de mineração. Em ambientes severos, com grandes massas movimentadas e operações contínuas, o hidrogênio particularmente em sistemas de célula a combustível, mas também em configurações híbridas ou em motores adaptados desponta como uma alternativa tecnicamente interessante entre outras em avaliação. A possibilidade de alta autonomia, atendimento a demandas de grande potência e emissões zero no ponto de uso tornam a tecnologia potencialmente vantajosa em minas subterrâneas e regiões remotas, onde ventilação e custos de combustível fóssil são fatores críticos. Ainda assim, custos de produção do hidrogênio verde, logística de armazenamento e transporte, eficiência de conversão e requisitos de segurança precisam ser equacionados antes de uma adoção ampla.

Segmento agrícola. Identifica-se um movimento gradual de adoção de soluções híbridas e elétricas, motivado pela busca por eficiência energética, redução de emissões e integração com práticas de agricultura de precisão. Plataformas híbridas ajudam a modular a entrega de potência e reduzir o consumo de combustíveis fósseis em ciclos variáveis de carga, enquanto máquinas totalmente elétricas começam a ser testadas ou implementadas em propriedades com infraestrutura compatível ou acesso a geração renovável local. Telemetria, automação e eletrificação tendem a evoluir de forma integrada, mas a viabilidade continua altamente dependente da escala da propriedade, da disponibilidade de energia e do perfil operacional das safras e implementos.

Síntese geral. Os resultados apontam que não existe uma solução universal para todos os contextos de uso de veículos extrapesados. Em vez disso, há um conjunto de caminhos complementares, como eletrificação direta, hidrogênio em diferentes cadeias tecnológicas, sistemas híbridos e, em alguns casos, o uso de biocombustíveis ou outros combustíveis de baixo carbono, cuja adequação varia conforme missão operacional, infraestrutura disponível, políticas públicas, custos totais de propriedade e metas de descarbonização. A transição requer coordenação entre montadoras, fornecedores de energia, governos, operadores de frotas e usuários finais, além de investimentos em infraestrutura, padronização técnica e incentivos econômicos alinhados a metas ambientais.

Entendemos que o objetivo definido no início do projeto foi alcançado: reunir e organizar fontes de qualidade sobre tecnologias de propulsão sustentável para veículos extrapesados, um campo ainda menos documentado em comparação aos veículos leves de uso cotidiano. O trabalho reforça a importância da inovação tecnológica com responsabilidade ambiental e sugere que eletrificação, hidrogênio e sistemas híbridos, entre outras soluções de baixo carbono, devem ser avaliados de forma integrada na construção de um futuro mais limpo, eficiente e resiliente para o transporte e a produção em larga escala.

7 PROPOSTA TRABALHOS FUTUROS

A busca por alternativas sustentáveis para aplicações em veículos pesados foi o foco central do trabalho desenvolvido, o qual investigou soluções viáveis para reduzir os impactos ambientais nos setores rodoviário, agrícola e de mineração, a pesquisa considerou aspectos técnicos, econômicos e ambientais de tecnologias emergentes voltadas à eficiência energética, analisando desde veículos híbridos e elétricos até possibilidades de biocombustíveis e combustíveis alternativos, sempre com o objetivo de aliar desempenho operacional à preservação ambiental. Ao longo do estudo, observou-se que a transição energética nesse segmento exige não apenas inovação tecnológica, mas também adaptação das infraestruturas, revisão de políticas públicas e mudança de paradigma por parte das empresas e operadores logísticos.

Nesse contexto, emergem duas frentes promissoras de investigação que podem complementar e aprofundar os resultados já alcançados. A primeira propõe avaliar a adaptação de caminhões de pequeno porte, especialmente os utilizados em ambientes urbanos, por meio da instalação de kits de conversão para Gás Natural Veicular, uma tecnologia consolidada, mas ainda pouco explorada. A segunda tem como foco os veículos de grande porte e seu potencial de operar com combustíveis sintético, com vistas à descarbonização de frotas pesadas nos setores de mineração, agricultura e transporte rodoviário de longa distância. A seguir, essas propostas são detalhadas com base em estudos acadêmicos que indicam sua relevância e viabilidade.

7.1 Proposta 1: Adaptação de um Caminhão de Pequeno Porte (VUC) com Kit de Conversão a Gás Natural Veicular

A busca por soluções sustentáveis no setor de transporte tem ganhado cada vez mais relevância diante dos desafios ambientais e da necessidade de redução de custos operacionais, especialmente em centros urbanos onde a circulação de veículos comerciais leves, como os VUCs, é intensa. Nesse cenário, a adaptação desses veículos para o uso de GNV aparece como uma alternativa viável e estratégica, já que esse tipo de combustível, além de mais limpo, é também mais barato em comparação

aos derivados do petróleo, contribuindo tanto para a diminuição das emissões poluentes quanto para a economia no abastecimento.

O objetivo deste trabalho é investigar a viabilidade da conversão de um caminhão de pequeno porte para GNV, analisando aspectos técnicos da instalação do kit de conversão, os impactos econômicos relacionados à operação do veículo após a adaptação, e os benefícios ambientais gerados a partir da substituição do combustível tradicional. Além disso, pretende-se avaliar os principais desafios associados a essa conversão, considerando o contexto urbano e os padrões atuais de mobilidade e logística de distribuição.

A justificativa para essa proposta encontra fundamento na crescente demanda por alternativas energéticas que aliem desempenho, economia e sustentabilidade. Estudos como o de Valiante (2006) mostram que a conversão de veículos leves para GNV apresenta viabilidade técnica, econômica e ambiental, sendo uma solução interessante tanto para empresas com frotas comerciais quanto para o setor público, especialmente em regiões metropolitanas que enfrentam altos níveis de poluição. Estender essa lógica para os VUCs pode maximizar os benefícios já observados em automóveis de passeio, oferecendo ganhos significativos em setores como entregas urbanas e distribuição de mercadorias.

A metodologia do estudo envolve a seleção de um modelo de VUC amplamente utilizado no mercado nacional, seguido da instalação de um kit de conversão de quinta geração, com todos os componentes necessários para garantir segurança e desempenho. Após a conversão, serão realizados testes comparativos para medir consumo de combustível, desempenho do motor e níveis de emissão de poluentes antes e depois da adaptação. Também será elaborada uma análise econômica com base no custo de instalação, manutenção e economia potencial no consumo de combustível ao longo de um ano de operação.

Como resultado, espera-se verificar uma redução significativa nas emissões de dióxido de carbono e outros poluentes, além da comprovação de uma economia relevante no custo por quilômetro rodado. O estudo também deverá identificar limitações técnicas, ajustes necessários na operação e eventuais impactos sobre o desempenho do veículo, o que permitirá compreender com mais clareza o real

potencial dessa tecnologia quando aplicada a caminhões de pequeno porte no contexto urbano

7.2 Proposta 2: Avaliação da Viabilidade do Uso de Combustíveis Sintéticos em Motos e Veículos Leves no Contexto Urbano

Em um cenário onde a busca por soluções sustentáveis se torna crescente , como citado acima, os combustíveis sintéticos, produzidos a partir de fontes renováveis e processos como a síntese de Fischer-Tropsch, surgem como opções promissoras para substituir a gasolina, oferecendo benefícios tanto ambientais quanto econômicos.

Este trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade técnica e econômica da substituição da gasolina por combustíveis sintéticos em motos e veículos leves utilizados em áreas urbanas, considerando os impactos ambientais dessa transição. A proposta inclui uma análise comparativa entre o uso de gasolina e de combustíveis sintéticos, avaliando o desempenho operacional, os custos envolvidos, a autonomia dos veículos e as emissões de gases poluentes.

A justificativa para esta proposta baseia-se na necessidade de encontrar soluções que conciliem eficiência energética, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, estudos recentes indicam que o uso de combustíveis sintéticos pode resultar em uma significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa, além de proporcionar economia no custo por quilômetro rodado.

A aplicação dessa tecnologia em motos e veículos leves, especialmente em contextos urbanos, pode contribuir para a melhoria da qualidade do ar e para a redução da dependência de combustíveis fósseis.

A metodologia da pesquisa envolve a seleção de modelos de motos e veículos leves amplamente utilizados em áreas urbanas, levantamento de dados operacionais e técnicos sobre consumo, emissão e desempenho com o uso de gasolina e combustíveis sintéticos, e projeção desses indicadores para diferentes cenários de adoção de combustíveis sintéticos. Serão analisados os custos de conversão, manutenção, logística de abastecimento e infraestrutura necessária, além de estudos

de caso com frotas que já utilizam ou testam combustíveis sintéticos como combustível primário, a fim de validar os dados obtidos em campo.

Como resultados, espera-se demonstrar que os combustíveis sintéticos podem representar uma alternativa real à gasolina em diversas aplicações urbanas, com impactos positivos tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, a pesquisa deverá contribuir para o avanço de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à descarbonização do transporte urbano, especialmente em setores estratégicos para a economia brasileira.

A base teórica desta proposta encontra respaldo no estudo de Ramos et al. (2011), que analisam a tecnologia de conversão de gás natural em combustíveis líquido, destacando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Os autores ressaltam que os combustíveis sintéticos produzidos por essa tecnologia apresentam alta qualidade, sendo desprovidos de metais pesados e compostos nitrogenados presentes no petróleo, o que resulta em menores emissões de poluentes.

Esses achados servem como referência para orientar as análises deste novo estudo, agora voltado à aplicação de combustíveis sintéticos em motos e veículos leves no contexto urbano brasileiro.

7.3 Proposta 3: Uso do Álcool como combustível em veículos pesados

Diante do crescente desafio da redução das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes, sobretudo na logística pesada, a busca por combustíveis renováveis tem ganhado cada vez mais destaque em pesquisas acadêmicas e políticas públicas. Um desses combustíveis, o etanol, já amplamente utilizado em veículos leves no Brasil, ainda carece de estudos aprofundados quando o foco recai sobre veículos pesados, como caminhões e ônibus urbanos ou intermunicipais. A proposta deste trabalho acadêmico futuro consiste em avaliar, de forma integrada, o desempenho ambiental e a viabilidade técnica e econômica da utilização do etanol como combustível alternativo em veículos pesados, utilizando a metodologia da ACV como principal ferramenta de análise.

A pesquisa poderá ser estruturada com base em três eixos centrais: ambiental, técnico-operacional e econômico, no aspecto ambiental, a aplicação da ACV permitirá quantificar os impactos associados à produção, distribuição e uso do etanol em motores pesados, com foco especial na categoria de potencial de aquecimento global. Serão considerados os ciclos completos, desde a extração da matéria-prima (como a cana-de-açúcar) até o uso final no veículo, estabelecendo comparações com o ciclo do diesel convencional e também com o biodiesel.

Essa abordagem “do berço ao túmulo” visa não apenas apontar os pontos críticos de emissão, mas também identificar oportunidades de mitigação nas etapas de cultivo, processamento, transporte e combustão.

No campo técnico-operacional, a proposta prevê o levantamento e análise de estudos sobre desempenho de motores adaptados ao etanol, seja em sistemas dedicados ou *dual-fuel*. Serão explorados temas como consumo específico, potência, autonomia, desgaste de componentes e adequação à realidade brasileira em termos de infraestrutura e disponibilidade de abastecimento. Além disso, será possível investigar o papel das misturas com diesel, como o E95, já utilizado em alguns países europeus, e o etanol hidratado puro (E100), avaliando as implicações mecânicas e logísticas dessas diferentes aplicações.

Já no eixo econômico, será desenvolvida uma análise de Custo Total de Propriedade, que considera não apenas o preço do combustível, mas também o investimento inicial em adaptação ou aquisição de veículos, os custos operacionais, de manutenção e a eventual necessidade de infraestrutura própria de abastecimento. Essa modelagem ajudará a compreender a competitividade do etanol frente ao diesel e outros combustíveis alternativos ao longo da vida útil dos veículos, a análise de viabilidade poderá ainda ser complementada com simulações de cenários regionais e projeções de políticas de incentivo.

Como base teórica e metodológica para esta proposta, poderia utilizar o estudo acadêmico de La Torre, Nogueira e Silva (2020), intitulado “Avaliação ambiental da substituição do diesel por etanol em ônibus urbanos: uma abordagem de ciclo de vida”. O trabalho foi publicado na revista Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento e utilizou a metodologia da ACV para comparar o impacto ambiental da substituição do diesel por etanol hidratado em ônibus urbanos na cidade de São Paulo. Os autores

concluíram que o uso do etanol poderia representar uma redução significativa nas emissões de GEE, principalmente quando o etanol é oriundo de regiões com alto rendimento agrícola e práticas sustentáveis. A pesquisa também ressaltou a importância de considerar as emissões indiretas, como o uso de fertilizantes e o transporte da biomassa, além de apontar que os impactos positivos só se confirmam plenamente quando há suporte logístico e regulatório para essa substituição.

Com base nos métodos utilizados por La Torre et al. (2020), o presente estudo poderá adaptar a estrutura de análise para veículos de carga pesada, expandindo os horizontes do uso do etanol além do transporte urbano de passageiros, a aplicação do modelo ACV permitirá que os dados levantados sejam contextualizados regionalmente e integrados à realidade do setor logístico nacional, oferecendo informações relevantes para gestores públicos, empresas de transporte e formuladores de políticas públicas.

Dessa forma, a proposta se justifica não apenas pela contribuição científica ao campo da engenharia ambiental e energética, mas também por seu potencial impacto social e estratégico, ao investigar as possibilidades reais de ampliação do uso de etanol na matriz energética do transporte pesado, o estudo pretende fornecer dados concretos para subsidiar decisões políticas e industriais, contribuindo para uma mobilidade mais limpa e sustentável no Brasil.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFC ENERGY. **Hydrogen fuel cell technology for industrial applications. Londres, 2023.** Disponível em: <https://www.afcenergy.com>. Acesso em: 24 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). **Boletim mensal do biodiesel. Brasília, DF: ANP, 2023.** Disponível em: <https://www.gov.br/anp/>. Acesso em: 24 maio 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Sumário mineral brasileiro 2024. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2024>. Acesso em: 6 maio 2025.

Al, Y. et al. **Quantifying air pollutant emission from agricultural machinery using surveys — A case study in Anhui, China. Atmosphere**, v. 12, p. 440, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/atmos12040440>. Acesso em: 14 jul. 2025.

AKASHI, A. Motor a combustão interna de hidrogênio (Nakata). Disponível em: <https://nakata.com.br/motor-a-combustao-interna-de-hidrogenio/>. Acesso em: 6 maio 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA AUTOMOTIVA (AEA). E-Delivery: o primeiro caminhão elétrico Volkswagen desenvolvido no Brasil pela AEA. São Paulo: AEA, 2021.

ALLEN, Robert C. *The Industrial Revolution: A Very Short Introduction*. Oxford: Oxford University Press, 2017.

ALVES, G. **Uso de H₂ em veículos leves: comparação do uso em motores de combustão interna e célula a combustível.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

AMBIENTE BRASIL. **Célula combustível – história.** 2025. Disponível em: https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/celula_combustivel_-_historia.html. Acesso em: 6 maio 2025.

AMERICAN CANAL SOCIETY. Barge Canal Construction Equipment, The Steam Shovel. Disponível em: <https://americancanalsociety.org/tag/marion-steam-shovel/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

AMERICAN MINE SERVICES. **History of mining technology.** Disponível em: <https://americanmineservices.com/history-of-mining-technology/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

ANDALUGA. **History of Mining Technology.** 2025. Disponível em: <https://andaluga.com.br/2021/03/16/conheca-a-primeira-escavadeira-hidraulica-do-mundo/#:~:text=Oficialmente%2C%20a%20primeira%20escavadeira%20hidr%C3%A1ulica>. Acesso em: 23 abr. 2025.

ANGLO AMERICAN. **Decarbonising our business and our planet.** 2025. Disponível em: https://southafrica.angloamerican.com/~/_media/Files/A/Anglo-American-Group/South-Africa/our-difference/nugen/nugen-brochure.pdf. Acesso em: 6 maio 2025.

ANTUNES, Paulo Donizete Ribeiro. **Veículos elétricos, funcionamento e seus benefícios.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – UNIFACVEST, Lages, 2018.

ASSUMPÇÃO, F. do C. **Veículos elétricos de carga – Uma análise de sua evolução histórica, perfil e possível utilização no Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro, 2016.

AUGA GROUP. **AUGA M1: AUGA group presents the first batch of the AUGA M1 hybrid tractor**. 2025. Disponível em: <https://auga.lt/en/media/auga-group-presents-the-first-batch-of-the-auga-m1-hybrid-tractor/>. Acesso em: 14 maio 2025.

AUGA YT CHANNEL. **AUGA M1 hybrid tractor from the first batch**. 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=qfBT-Ga0T8Qv>. Acesso em: 14 maio 2025.

AYYAPPAN, B. Prakash; REUBEN, B.; SARANYA, S.; RUCKMANI, S.; PARVEEN BANU, M. **Comparative overview of Compressed Natural Gas Vehicle (CNGV) and Electric Vehicle (EV)**. International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering, v. 12, n. 7, 2024.

BASMA, H.; ZHOU, Y.; RODRÍGUEZ, F. **Fuel-cell hydrogen long-haul trucks in Europe: a total cost of ownership analysis**. The International Council on Clean Transportation, 2023.

BALDESSIN, N. E.; BARRETO, E. O.; AGUIAR, N. A. O. **Análise da viabilidade da implementação de caminhões elétricos e a ineficiência dos veículos elétricos: desafios e oportunidades**. Revista FT, v. 28, n. 130, 2024. Disponível em: <https://revistافت.com.br/analise-da-viabilidade-da-implementacao-de-caminhoes-eletricos-e-a-ineficiencia-dos-veiculos-eletricos-desafios-e-oportunidades/>. Acesso em: 8 out. 2024.

BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. **Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil**. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 33, p. 207–224, mar. 2011.

BARBOSA, L. P. **Proposta de rede para postos de GNV no Maranhão através de otimização espacial**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Maranhão, São Luís – MA, 2024.

BARBOSA, M. W.; SOUSA, P. R.; OLIVEIRA, L. K. **The effects of barriers and freight vehicle restrictions on logistics costs: a comparison before and during the COVID-19 pandemic in Brazil**. *Sustainability*, v. 14, n. 14, p. 8650, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su14148650>. Acesso em: 14 jul. 2025.

BEM PARANÁ. **“Corredor Sustentável” do Paraná terá mais um posto para motorista abastecer com GNV**. 2025. Disponível em: <https://www.bemparana.com.br/noticias/economia/corredor-sustentavel-do-parana-tera-mais-um-posto-para-motorista-abastecer-com-gnv/>. Acesso em: 3 maio 2025.

BRASIL POSTOS. **GNV e Biogás aparecem como tendência para o futuro próximo**. 2025. Disponível em: <https://www.brasilpostos.com.br/noticias/gnv/gnv-e-biogas-aparecem-como-tendencia-para-o-futuro-proximo/>. Acesso em: 3 maio 2025.

BRITO, M. R.; COSTA, J. H.; OLIVEIRA, L. F. **Viabilidade técnica e econômica do uso de biodiesel na mineração brasileira**. *Revista Engenharia e Meio Ambiente*, v. 15, n. 1, p. 87–101, 2022.

BOEHM, S. et al. **State of climate action, 2023**. Disponível em: <https://files.wri.org/d8/s3fs-public/2023-11/state-climate-action-2023.pdf>. Acesso em: 7 maio 2025.

BORGES, Barsanufio Gomides. **Ferrovia e modernidade**. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/694/o/11_dossie_ferrovia.pdf. Acesso em: 7 abr. 2025.

BOTTA, G. F. et al. **Soil sustainability: analysis of the soil compaction under heavy agricultural machinery traffic in extensive crops**. *Agronomy*, v. 12, p. 282, 2022.

BODZIONY, Przemysław; PATYK, Michał. **The influence of the mining operation environment on the energy consumption and technical availability of truck haulage operations in surface mines**. *Energies*, Basel, v. 17, n. 2654, p. 1–18, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en17112654>. Acesso em: 12 jul. 2025.

BUILCHI, Paulo Vitório. **Máquinas e mecanização agrícola**. 1. ed. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2016. 367 p.

CARDENAS, José. **Novas plataformas na agricultura de precisão**. Disponível em: <https://josecardenas.com/2018/07/nueva-fase-de-la-agricultura-de-precision-plataformas-web/>. Acesso em: 03 nov. 2024.

CARNEY HERITAGE PRODUCTIONS. **Discover the heritage of Scotland**. Publicado em: 27 mar. 2019. Disponível em: <https://www.scottishheritage.co.uk/the-plough/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CASIMIRO, P. Aula – **Sistemas hidráulicos**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2015. Disponível em: http://www.ler.esalq.usp.br/disciplinas/Casimiro/leb332/Aula_sist_hidraulicosCasimiro.pdf. Acesso em: 19 mar. 2025.

CATERPILLAR. **A história do nome Caterpillar.** Disponível em: <https://www.caterpillar.com/pt/company/history/archive/caterpillar-name.html#multimedia-YAlzT1UKUfnoNUW-gallery>. Acesso em: 3 nov. 2024.

CATERPILLAR. **Nossa história.** Disponível em: <https://www.caterpillar.com/pt/company/history/history-timeline.html>. Acesso em: 3 nov. 2024.

CALLIL, J.; COSTANZO, L. **A transição para frotas elétricas: impactos econômicos e ambientais.** Centro de Estudos de Mobilidade Urbana, 2022.

CARRIÓN, N. **Diseño de la mayor planta de hidrógeno verde para uso industrial en Europa.** 2021. Disponível em: <https://www.tecnicaindustrial.es/wp-content/uploads/Numeros/118/7604/a7604.pdf>. Acesso em: 5 maio 2025.

CARVALHO, C. H. R. de. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros.** Instituto de Pesquisa e Economia Aplicada, 2011.

CARVALHO, F.; OSIPOVA, L.; ZHOU, Y. **Emissões de gases de efeito estufa do ciclo de vida do hidrogênio como combustível marítimo e custo de produção do hidrogênio verde no Brasil.** The International Council on Clean Transportation, 2023.

CARVALHO, J. A. **CO2 Emission Factors and Carbon Losses for Off-Road Mining Trucks.** Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2022.

CASTRO, N. **A Economia do Hidrogênio: Transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil.** Rio de Janeiro – RJ, 2023. Disponível em:

https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2023/04/livro_economia_do_h2.pdf.

Acesso em: 19 mar. 2025.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Evolução e futuro do Proconve**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/server/api/core/bitstreams/5de4500a-d09f-4221-889f-a4b435bdbad9/content>. Acesso em: 4 nov. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo**. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2020.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE MUNICÍPIOS (CNM). **Análise do impacto da frota de veículos nos Municípios brasileiros**. 2023. Disponível em: https://cnm.org.br/storage/biblioteca/2023/Estudos_tecnicos/202309_ET_MOB_Impacto_frota_veiculos.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (CNI). **Hidrogênio sustentável**. 2025. Disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/industria-sustentavel/temas-de-atuacao/energias-renovaveis/hidrogenio-sustentavel/>. Acesso em: 6 maio 2025.

CORREIA, R. J. D. S. **Mobilidade sustentável: avaliação do impacto da introdução de veículos elétricos: caso Força Aérea Portuguesa**. 2020. Dissertação (Doutorado) – Instituto Politécnico de Setúbal.

COSTA, C. A. R.; PRADO, L. F. **Estudo comparativo envolvendo três métodos de cálculo de custo de projeto de transporte coletivo urbano**. Revista Árvore, p. 855–863, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/LQgcYRQFrSj3FM3YKR43b6n/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 5 maio 2025.

COSTA, Ronaldo Silvestre da. **Quantificação das emissões de gases de efeito estufa para veículos de coleta de resíduos domiciliares abastecidos com GNV e Diesel-B5 utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV).** 2016. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, Porto Alegre.

CULTIVAR. **Formas de utilizar a potência do trator.** Revista Cultivar, 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/formas-de-utilizar-a-potencia-do-trator>. Acesso em: 19 mar. 2025.

CUMMINS. **O que é uma célula a combustível? 2025.** Disponível em: <https://www.cummins.com/pt/news/2021/10/18/what-fuel-cell>. Acesso em: 6 maio 2025.

DREW, Nick. **Classic archive Poclain excavator photos.** Disponível em: https://www.earthmoversmagazine.co.uk/digger-man/view%2Cclassic-archive-poclain-excavator-photos-blog-post-revisited_1381.htm. Acesso em: 23 abr. 2025.

DAIMLER TRUCK. **More than 15,000 kilometers traveled: All-electric Mercedes-Benz eActros 600 testing tour throughout Europe completed successfully.** 2024. Disponível em: <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/more-than-15000-kilometers-traveled-all-electric-mercedes-benz-eactros-600-testing-tour-throughout-europe-completed-successfully-52780594>. Acesso em: 3 mar. 2025.

DELANO, Jack. **WPA-Federal Art Project photographs of Pennsylvania coal miners and coal mining communities.** Disponível em: <https://www.loc.gov/pictures/item/2001695929/>. Acesso em: 3 maio 2025.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). **Manual de estudos de tráfego (Publicação IPR - 723)**. Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Rio de Janeiro, 2006.

DIETSCHE, Karl-Heinz. **History of the diesel engine**. In: **Fundamentals of Automotive and Engine Technology: Standard Drives, Hybrid Drives, Brakes, Safety Systems**. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.

DNIT – DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Os desafios para implementação dos veículos elétricos no Brasil**, 2021.

DUPONT. **Tudo o que ainda não te contaram sobre o gás natural**. 2021. Disponível em: <https://www.dupont.com.br/personal-protection/falando-de-protecao/tudo-o-que-ainda-nao-te-contaram-sobre-sobre-o-gas-natural.html>. Acesso em: 3 maio 2025.

ECOS. **Eletrólise da água – O que é, como funciona e sua presença no futuro**. Publicado em: 28 mar. 2025. Disponível em: <https://123ecos.com.br/docs/eletrolise-da-agua/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

ENGIE. **ENGIE and Anglo American inaugurate the world's largest hydrogen mining truck**. Publicado em: 6 maio 2022. Disponível em: <https://www.engie.com/en/news/ENGIE-Anglo-American-inaugurate-nuGen?>. Acesso em: 19 maio 2025.

ESTÊVÃO, T. E. R. **O Hidrogénio como combustível**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

EHSANI, M.; GAO, Y.; LONGO, S.; EBRAHIMI, K. M. **Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

EV MOTORWATT. **Mercedes-Benz eActros 600**, 2024. Disponível em: <https://ev.motorwatt.com/ev-database/database-electric-trucks/mercedes-benz-eactros-600>. Acesso em: 5 maio 2025.

EPE. **Hidrogênio Cinza: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrog%C3%AAnio%20Cinza.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.

EPE. **Hidrogênio Azul: Produção a partir da reforma a vapor do gás natural**. 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-654/NT%20Hidrogenio%20Azul.pdf>. Acesso em: 30 abr. 2025.

ESTADÃO. **Hyundai Nexo vai testar hidrogênio feito a partir de etanol no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://jornaldocarro.estadao.com.br/carros/hyundai-nexo-vai-testar-hidrogenio-feito-a-partir-de-etanol-no-brasil/>. Acesso em: 6 maio 2025.

ESTRADÃO. **Hyundai Xcient é o primeiro caminhão movido a hidrogênio à venda**. 2025. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/hyundai-xcient-e-o-primeiro-caminhao-movido-a-hidrogenio-a-venda/>. Acesso em: 6 maio 2025.

ENERGY VAULT. **Calistoga Resiliency Center**. 2025. Disponível em: <https://www.energyvault.com/projects/calistoga>. Acesso em: 9 abr. 2025.

FENDT. **Fendt e107 V Vario.** 2023. Disponível em: <https://www.fendt.com/br/totalmente-eletrico-o-fendt-e100-v-vario-pc-23>. Acesso em: 24 abr. 2025.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO PARANÁ (FIEP). **Hidrogênio Renovável: Uma alternativa para a transição energética.** 2025. Disponível em: https://paineldemudancasclimaticas.org.br/noticia/hidrogenio-renovavel?utm_source. Acesso em: 30 abr. 2025.

FIGUEIREDO, G. C. **A revolução dos Evolts: como os veículos elétricos de decolagem e pouso vertical podem impactar a sociedade, a economia e o meio ambiente.** Centro Universitário Sagrado Coração – Unisagrado, Bauru-SP, 2023.

FIGUEIREDO, R. L. A. **Importância do hidrogênio na indústria de mineração como fonte de energia renovável,** 2025. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/374849635_Importancia_do_hidrogenio_na_industria_de_mineracao_como_fonte_de_energia_renovavel. Acesso em: 25 abr. 2025.

FILHO, A. D. de O. **Substituição de diesel por gás natural em ônibus do transporte público urbano.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo – SP. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-18062024-161817/pt-br.php>. Acesso em: 5 maio 2025.

FIRST MODE. **First Mode movimenta o maior veículo zero emissão do mundo para a Anglo American.** Disponível em: <https://firstmode.com/updates/press-release-first-mode-powers-worlds-largest-zero-emission-vehicle-for-mining-giant-anglo-american.com>. Acesso em: 6 maio 2025.

FREITAS, Joaquim Carlos Novais de. **Projeto e análise ao funcionamento de carros elétricos**. 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Portugal.

FREITAG, T. E. **Análise da competitividade do gás natural como combustível para veículos leves de passageiros no Brasil**. 2019. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria – RS.

FREEPIK. **Conjunto de pilhas de diferentes tamanhos AA, AAA, C, D, PP3 9V - ilustração em vetor isolada no branco**. Disponível em: https://br.freepik.com/vetores-premium/conjunto-de-pilhas-de-diferentes-tamanhos-aa-aaa-c-d-pp3-9v-ilustracao-em-vetor-isolada-no-branco_36952225.htm. Acesso em: 17 jul. 2025.

FREULON, Matthieu. **New Holland T6 Methane Power: pour qui et quelles utilisations?** Réussir Machinisme, 2022. Disponível em: <https://www.reussir.fr/machinisme/new-holland-t6-methane-power-pour-qui-et-queelles-utilisations>. Acesso em: 14 maio 2025.

FUTURE FARMING. **Test drive with the electric narrow-track tractor Fendt e107V**. 2025. Disponível em: <https://www.futurefarming.com/tech-in-focus/test-drive-with-the-electric-narrow-track-tractor-fendt-e107v/>. Acesso em: 12 maio 2025.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Lei do hidrogênio verde atende critérios no Brasil**. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2024/08/potencial-poluente-maior-de-hidrogenio-verde-atende-a-criterios-do-brasil-diz-forum-economico-mundial.shtml?>. Acesso em: 30 abr. 2025.

FONDATION POCLAIN. **POCLAIN, a story like no other!**. Disponível em: <https://www.fondation-poclain.com/en/histoire?>. Acesso em: 10 abr. 2025.

GAN, Yu et al. **Cradle-to-Grave Lifecycle Analysis of Greenhouse Gas Emissions of Light-Duty Passenger Vehicles in China: Towards a Carbon-Neutral Future.** Sustainability, v. 15, n. 3, p. 2627, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su15032627>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GERUTU, G. B.; GREYSON, K. A.; CHOMBO, P. V. **Compressed Natural Gas as an Alternative Vehicular Fuel in Tanzania: Implementation, Barriers, and Prospects. Methane,** v. 2, p. 66–85, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/methane2010006>. Acesso em: 16 jul. 2025.

GENERAL SERVICES ADMINISTRATION. **What's new with suppliers—Medium/heavy trucks.** 2023, January. Disponível em: https://www.gsa.gov/system/files/Medium_Heavy_Truck_Supplier_Panel_Final_508.pdf. Acesso em: 28 mar. 2025.

GHISOLFI, V. et al. **Evaluating impacts of overweight in road freight transportation: a case study in Brazil with system dynamics.** Sustainability, v. 11, n. 11, p. 3128, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su11113128>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GIZ. **Mapeamento do Setor de Hidrogênio Brasileiro: Panorama Atual e Potenciais para o Hidrogênio Verde.** Disponível em: https://energypartnership.com.br/fileadmin/brazil/media_elements/Mapeamento_H2_-_Diagramado_-_V2g.pdf. Acesso em: 10 maio 2025.

GREGORY CONSTRUCTION. **Pioneers in Construction: Sir W.G. Armstrong and the Hydraulic Excavator.** Disponível em: <https://gregoryconstruction.com/history-construction-equipment-excavator/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GRUPO TREC BEL. **Máquinas Escavadeiras: Evolução e Impacto na Indústria.**

Disponível em: <https://www.tracbel.com.br/blog/escavadeiras-evolucao-e-impacto/#:~:text=A%20primeira%20escavadeira%20mec%C3%A2nica%20reconhecida,por%20uma%20m%C3%A1quina%20a%20vapor>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GRUPO TREC BEL. **Escavadeira Volvo EC200D: conheça as principais características!.**

Disponível em: <https://www.tracbel.com.br/blog/escavadeira-volvo-ec200d/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GONZALES, E. A. T. E. R. Célula de combustível: **Uma alternativa promissora para geração de eletricidade.**

Departamento de Química e Física Molecular, Instituto de Física e Química de São Carlos, Universidade de São Paulo (USP), São Carlos – SP, 1989.

Disponível em: [http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/1989/vol12n3/v12_n3_%20\(10\).pdf](http://submission.quimicanova.sbq.org.br/qn/qnol/1989/vol12n3/v12_n3_%20(10).pdf). Acesso em: 23 abr. 2025.

GOTZ, H. W. M.; LINARD, M. **Tecnologia de células a combustível.** Institut für Chemische Technologie - Technische Universität Darmstadt, Alemanha, 1999.

Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/NYnZ6bbM7TY6RKRGGTJTmqr/>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GUAN, C. et al. **Design and experiment of electric uncrewed transport vehicle for solanaceous vegetables in greenhouse.** Agriculture, v. 15, p. 118, 2025.

Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15020118>. Acesso em: 14 jul. 2025.

GURLIT, W.; GUILLAUMON, J. **Hidrogênio verde: uma oportunidade de geração de riqueza com sustentabilidade, para o Brasil e o mundo.**

Disponível em: <https://www.mckinsey.com.br/our-insights/hidrogenio-verde-uma-oportunidade-de-geracao-de-riqueza-com-sustentabilidade-para-o-brasil-e-o-mundo?>. Acesso em: 30 abr. 2025.

HAN, G.-G. et al. **Analysis of air pollutant emission inventory from farm tractor operations in Korea.** Engineering Proceedings, v. 11, p. 17, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ASEC2021-11187>. Acesso em: 14 jul. 2025.

HODGE, C.; RUFF, S. Effects of Natural Gas Vehicles. Utah Transportation Center, Utah – EUA, 2015.

HONDA. **Honda Clarity Fuel Cell, 2017.** Disponível em: <https://hondanews.eu/pt/pt/cars/media/pressreleases/106755/honda-clarity-fuel-cell-2017>. Acesso em: 6 maio 2025.

HRICA, Jonathan K. et al. **A rapid review of collision avoidance and warning technologies for mining haul trucks.** Mining, Metallurgy & Exploration, v. 39, n. 4, p. 1357–1389, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00633-w>. Acesso em: 12 jul. 2025.

HYUNDAI. **Hyundai NEXO: um carro a hidrogênio.** Disponível em: <https://www.hyundai.com.br/universo-hyundai/veiculos/nexo.html>. Acesso em: 29 abr. 2025.

HYUNDAI. **Hyundai XCIENT Fuel Cell Truck.** 2025. Disponível em: https://www.hyundainews.com/en-us/models/hyundai-xcient_fuel_cell_truck/releases#releases. Acesso em: 6 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **XCMG realiza testes com o caminhão de mineração XDE260 no Brasil.** Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/xcmg-realiza-testes-com-o-caminhao-de-mineracao-xde260-no-brasil/>. Acesso em: 15 maio 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Hydrogen Review**, 2022. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **The Future of Trucks: Implications for Energy and the Environment**. Paris, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org>. Acesso em: 24 maio 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Trucks and Buses**. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses>. Acesso em: 8 out. 2024.

GOOGLE IMAGEM. Disponível em: <https://i.pinimg.com/736x/a3/3e/88/a33e8832438f7749d5958aec816cfefc.jpg>. Acesso em: 3 nov. 2024.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Green Hydrogen: A Guide to Policy Making**. Abu Dhabi, 2022. Disponível em: <https://www.irena.org>. Acesso em: 24 maio 2025.

ISTOCK. **Um semi-caminhão de célula de combustível de hidrogênio com cilindro de gás H2 - Imagem em alta resolução**, 2021. Disponível em: <https://www.istockphoto.com/br/foto/um-semi-caminh%C3%A3o-de-c%C3%A9lula-de-combust%C3%ADvel-de-hidrog%C3%AAnio-com-cilindro-de-g%C3%A1s-h2-gm1340190841-420332527>. Acesso em: 12 abr. 2025.

IVECO. **IVECO STRALIS 460NR EUROTRONIC**, 2011. Disponível em: https://www.iveco.com/brasil/collections/technical_sheets/Documents/Produtos/StralisEuro_Tecnico_VersaoGrande_Final.pdf. Acesso em: 12 mar. 2025.

IVECO. **New Stralis NP 460: a complete range of natural gas trucks for all missions**, 2017. Disponível em: <https://www.iveco.com/global/Press/PressReleases/2017/New-Stralis-NP-460-a-complete-range-of-natural-gas-trucks-for-all-missions>. Acesso em: 12 mar. 2025.

IVECO. **New Stralis NP Pure Power**, 2018. Disponível em: <https://www.iveco.com/sea/collections/catalogues/Documents/Brochures/StralisNP.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2025.

KHAN, Muhammad Imran; YASMIN, Tabassum; SHAKOOR, Abdul. **International experience with compressed natural gas (CNG) as environmental friendly fuel**. *Energy Systems*, v. 6, n. 2, p. 145–160, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12667-015-0152-x>. Acesso em: 16 jul. 2025.

KRAGHA, O. **Economic and environmental implications of natural gas vehicles: A case study**. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge – EUA, 2010.

KOMATSU. **GM e Komatsu colaboram no desenvolvimento de caminhão de mineração com célula de combustível a hidrogênio**. Disponível em: <https://www.komatsu.com/en/newsroom/2023/gm-komatsu-collaborate-on-hydrogen-fuel-cell-mining-truck/>. Acesso em: 15 maio 2025.

KÖNIG, A. et al. **Energy efficiency and environmental impact of electric trucks in mining**. *Journal of Cleaner Production*, v. 316, p. 128-145, 2021.

KOREA ADVANCED INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY (KAIST). **Liquid Hydrogen Storage**. Disponível em:

<https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/>. Acesso em: 03 maio 2025.

LA TORRE, T. L.; NOGUEIRA, L. A. H.; SILVA, J. E. A. **Avaliação ambiental da substituição do diesel por etanol em ônibus urbanos: uma abordagem de ciclo de vida**. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v. 12, n. 1, p. 28–45, 2020.

LAUVAUX, Thomas et al. **Global Assessment of Oil and Gas Methane Ultra-Emitters**. arXiv preprint arXiv:2105.06387, 2021.

LACERDA, Sander Magalhães. **O financiamento da infraestrutura rodoviária através de contribuintes e usuários**. BNDES, 2005.

LEÃO, M. M. O. **O hidrogênio verde: principais perspectivas no cenário energético brasileiro**. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2023.

MANAGEMENT SOLUTIONS. **Hidrogênio, um vetor energético essencial na transição para uma economia descarbonizada, 2023**. Disponível em: <https://www.managementsolutions.com/sites/default/files/minisite/static/5e63d3cb-196a-44b3-803e-551bce564732/nl-h2/pdf/h2-vetor-energetico-07.pdf?>. Acesso em: 31 abr. 2025.

MADSEN, H. T. **Tratamento de água para a geração de hidrogênio verde**. Disponível em: <https://hydrogentechworld.com/water-treatment-for-green-hydrogen-what-you-need-to-know>. Acesso em: 31 abr. 2025.

MANCUZO, R. **Multinacional de mineração revela gigantesco caminhão a hidrogênio capaz de carregar 290 toneladas, 2022**. Disponível em: <https://olhardigital.com.br/2022/05/11/carros-e-tecnologia/multinacional-de->

mineracao-revela-gigantesco-caminhao-a-hidrogenio-capaz-de-carregar-290-toneladas/. Acesso em: 31 abr. 2025.

MARQUES, E. W. V. **A aplicação das novas tecnologias para produção de GNL no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro – RJ, 2018.

MARS, Aaron W. **South Carolina Railroad**. Disponível em: <https://www.scencyclopedia.org/sce/entries/south-carolina-railroad/>. Acesso em: 23/03/2025.

MARTINS, Fernando; SOARES, Vanessa; CAMMARATA, Felipe. Infraestrutura rodoviária no Brasil: uma proposta para desenvolvê-la. São Paulo: BAIN & COMPANY, jun. 2013.

MAZZARELLA, L. et al. Hydrogen and Battery Electric Trucks: A Realistic Assessment. *Transportation Research Part D*, v. 97, p. 102917, 2021.

McKAIN, Kathryn et al. Pump-to-Wheels Methane Emissions from the Heavy-Duty Transportation Sector. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 10, p. 5469–5475, 2016.

MERCEDES-BENZ TRUCKS. Mercedes-Benz eActros 600. 2024. Disponível em: <https://www.mercedes-benz-trucks.com/int/en/trucks/eactros-600.html>. Acesso em: 03 mar. 2025.

MERCEDES-BENZ TRUCKS. História. Disponível em: <https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/institucional/historia/caminhoes>. Acesso em: 27 out. 2024.

METÁLICA. Cronologia do uso dos metais. Disponível em: <https://metalica.com.br/cronologia-do-uso-dos-metais-2/>. Acesso em: 18 mar. 2025.

MENA, Rafael M.; SANTOS, Milana L.; SAIDEL, Marco A. Análise de veículos elétricos a bateria no Brasil: uma abordagem SWOT. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020.

MENESES, David; SEPÚLVEDA, Felipe D. **Modeling productivity reduction and fuel consumption in open-pit mining trucks by considering the temporary deterioration of mining roads through discrete-event simulation**. Mining, Basel, v. 3, p. 96–105, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mining3010006>. Acesso em: 12 jul. 2025.

MIA – MÁQUINAS & INOVAÇÕES AGRÍCOLAS. **Uma breve história do trator e sua importância na mecanização agrícola**, 27 nov. 2023. Disponível em: <https://portalmaquinasagricolas.com.br/uma-breve-historia-do-trator-e-sua-importancia-na-mecanizacao-agricola/>. Acesso em: 23 out. 2024.

MICHELENA, B. D. **Modelo temporal da oferta e demanda do Gás Natural Liquefeito no Brasil**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia, Salvador–BA, 2018.

MIRACCA, M. B.; HASS, R. L. **O futuro do gás GNV nos motores bicombustíveis**. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, SP, 2021.

MIRANDA, D. P.; FERREIRA, A. M.; OLIVEIRA, R. C. **Sustentabilidade do biodiesel frente à segurança alimentar: desafios e oportunidades**. Revista Brasileira de Bioenergia, v. 14, n. 2, p. 55-68, 2022.

MOCERA, F.; SOMÀ, A.; MARTELLI, S.; MARTINI, V. **Trends and Future Perspective of Electrification in Agricultural Tractor-Implement Applications**. Politecnico di Torino, Torino, Italy, 2023.

MONDO MACCHINA. **SESAM, the John Deere 100% electric, 2017**. Disponível em: <https://www.mondomacchina.it/en/sesam-the-john-deere-100-electric-c1646>. Acesso em: 02 maio 2025.

MORAIS, Rafaela Cancell. **A experiência do gás natural veicular no Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Economia, Rio de Janeiro - RJ, 2013.

MORDOR INTELLIGENCE. **Análise de mercado de caminhões pesados, 2013**. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/heavy-duty-trucks-market>. Acesso em: 10 nov. 2024.

MOREIRA, William Klaus. **Análise e projeto de sistemas de propulsão híbridos para tratores agrícolas**. Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2022.

MORONI, E. G. **Implementação de Gás Natural Liquefeito (LNG) em veículos pesados**. São Paulo: Editora Técnica, 2020.

MOSTAGI, Yuri Mendes; CASTELLANI, Ana Mauriceia; ROMÃO, Arthur De Abreu; COSTA, Bruno Leandro Galvão. **Célula de Combustível**. Faculdade Pitágoras, 2023.

MYERS, Michel William Carvalho. **Análise de viabilidade econômica e financeira entre um caminhão da categoria VUC com motor diesel e um caminhão com motor elétrico**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2021.

NATURGY. **GNV por carreta, 2025.** Disponível em: https://www.naturgy.com.br/gnv/exclusivo_para_postos/por_gnc/. Acesso em: 03 maio 2025.

NEIVA, D. B. M. **Estudo de viabilidade econômica e energética da substituição da frota da Ambev por caminhões elétricos.** Projeto de Graduação – Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2019.

NEW HOLLAND AGRICULTURE. **T6 Methane Power.** New Holland Brasil, 2025. Disponível em: <https://newholland.com.br/agriculture/tratores/t6-methane-power/>. Acesso em: 14 maio 2025.

NEW HOLLAND. **T4 Electric Power.** 2025. Disponível em: <https://agriculture.newholland.com/pt-pt/europe/produtos/tratores-agricolas/t4-electric-power>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NISENBAUM, M. A. **Pilhas e baterias.** 2017. Disponível em: <https://www.cliqueapostilas.com.br/eletrica/pilhas-e-baterias-iii>. Acesso em: 15 maio 2025.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento.** Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Belo Horizonte, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. **Impactos ambientais do biodiesel de soja: uma análise do ciclo de vida no contexto brasileiro.** Biomassa & Energia, v. 5, n. 2, p. 25–35, 2021.

OEM OFF-HIGHWAY. **First electric-powered excavator brings efficiencies to construction industry.** Disponível em: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/article/10248117/historical-construction-equipment-association-hcea-first-electricpowered-excavator-brings-efficiencies-to-construction-industry>. Acesso em: 23 abr. 2025.

O MUNDO VARIÁVEL. **Tratores a vapor.** Disponível em: <https://omundovariavel.blogspot.com/2015/08/tratores-vapor.html>. Acesso em: 03 nov. 2024.

OLIVEIRA, D. D. S.; MARTINS, H. D.; KASTRUP, M. M. **Análise comparativa entre veículos automotivos elétricos, híbridos e downsizing de motores.** Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, J. V. F. de; SOUZA, V. D. de. **Veículos elétricos: histórias e seus benefícios.** Faculdade Tecsuma, Engenharia Mecânica – Paracatu, MG, 2024.

OLIVEIRA, L. K. et al. **An overview of problems and solutions for urban freight transport in Brazilian cities.** Sustainability, v. 10, n. 4, p. 1233, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10041233>. Acesso em: 14 jul. 2025.

OLIVEIRA, R. C. **Panorama do hidrogênio no Brasil.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 15 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório anual Brasil 24.** 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/292259-relat%C3%B3rio-anual-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas-no-brasil-2024>. Acesso em: 29 set. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Aumento do número de veículos pesados usados contribui para a escalada da poluição, elevando a demanda por regulamentações mais rigorosas.** 22 fev. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/aumento-do-numero-de-veiculos-pesados-usados>. Acesso em: 29 set. 2024.

NEW HOLLAND. **T4 Electric Power.** 2025. Disponível em: <https://agriculture.newholland.com/pt-pt/europe/produtos/tractores-agricolas/t4-electric-power>. Acesso em: 15 jan. 2025.

NISENBAUM, M. A. **Pilhas e baterias,** 2017. Disponível em: <https://www.cliqueapostilas.com.br/eletrica/pilhas-e-baterias-iii>. Acesso em: 15 maio 2025.

NOCE, Toshizaemom. **Estudo do funcionamento de veículos elétricos e contribuições ao seu aperfeiçoamento.** Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais (PUC-MG), Belo Horizonte, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H.; CAPAZ, R. S. **Impactos ambientais do biodiesel de soja: uma análise do ciclo de vida no contexto brasileiro.** Biomassa & Energia, v. 5, n. 2, p. 25–35, 2021.

OEM OFF-HIGHWAY. **First electric-powered excavator brings efficiencies to construction industry.** Disponível em: <https://www.oemoffhighway.com/market-analysis/article/10248117/historical-construction-equipment-association-hcea-first-electricpowered-excavator-brings-efficiencies-to-construction-industry>. Acesso em: 23 abr. 2025.

O MUNDO VARIÁVEL. **Tratores a vapor.** Disponível em: <https://omundovariavel.blogspot.com/2015/08/tratores-vapor.html>. Acesso em: 03 nov. 2024.

OLIVEIRA, D. D. S.; MARTINS, H. D.; KASTRUP, M. M. **Análise comparativa entre veículos automotivos elétricos, híbridos e downsizing de motores.** Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Rio de Janeiro, 2022.

OLIVEIRA, J. V. F. de; SOUZA, V. D. de. **Veículos elétricos: histórias e seus benefícios.** Faculdade Tecsoma, Engenharia Mecânica – Paracatu, MG, 2024.

OLIVEIRA, L. K. et al. **An overview of problems and solutions for urban freight transport in Brazilian cities.** *Sustainability*, v. 10, n. 4, p. 1233, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su10041233>. Acesso em: 14 jul. 2025.

OLIVEIRA, R. C. **Panorama do hidrogênio no Brasil.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11291/1/td_2787_web.pdf. Acesso em: 15 maio 2025.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Relatório anual Brasil 24**, 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/292259-relat%C3%B3rio-anual-das-na%C3%A7%C3%B5es-unidas-no-brasil-2024>. Acesso em: 29 set. 2024.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Aumento do número de veículos pesados usados contribui para a escalada da poluição, elevando a demanda por regulamentações mais rigorosas.** 22 fev. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/aumento-do-numero-de-veiculos-pesados-usados>. Acesso em: 29 set. 2024.

PADOVAN, Luiz Atílio. **Operação de tratores agrícolas**. Curitiba: SENAR AR-PR, 2018.

PAIVA, E. V. M. **Ciclo de trigerção de um motor diesel marítimo alimentado com gás natural: análise energética e exergética**. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal – RN, 2019.

PARDESHI PATEEK. **The Hybrid Auga M1**. 2022. Disponível em: <https://commercialvehicle.in/the-hybrid-auga-m1/>. Acesso em: 14 maio 2025.

PASCUZZI, S.; ŁYP-WROŃSKA, K.; GDOWSKA, K.; PACIOLLA, F. **Sustainability Evaluation of Hybrid Agriculture-Tractor Powertrains**. Sustainability, v. 16, n. 3, p. 1184, jan. 2024. DOI: 10.3390/su16031184. Acesso em: 10 maio 2025.

PELLIZA, G. **Análise de veículos convertidos para o uso de combustível gás**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

PEREIRA, A.; REIS, D. E.; SANTOS, L. E.; JUDICE, G. H. **A implementação do gás natural veicular (GNV) em veículos pesados**. Grupo Ânima Educação, 2021.

PICKEL, Peter. **Electricity for tractors and tractor-implement systems**. In: **CLUB OF BOLOGNA**. 29th Members' Meeting Proceedings. Hannover: Club of Bologna, 2019. Disponível em: <https://www.scribd.com/document/686094585/2019-KNR-S2-1-Pickel-original>. Acesso em: 10 mai. 2025.

PLACAFIPE. **Tabela FIPE Scania G-360 A 4x2 3-Eixos/A 6x2 2p (diesel) (E5).** Disponível em: <https://placafipe.com/tabela-fipe/caminhoes/scania/g-360-a-4x2-3-eixos-a-6x2-2p-dies-e5/2017>. Acesso em: 6 jun. 2025.

PLACAFIPE. **Tabela FIPE Volkswagen 14-410 e-Delivery 6x2 2p (Elétrico).** Disponível em: <https://placafipe.com/tabela-fipe/caminhoes/volkswagen/14-410-e-delivery-6x2-2p-eletrico/2025>. Acesso em: 6 jun. 2025.

PLOTKIN, S. E., & SINGH, M. **The heavy-duty vehicle future in the United States: A parametric analysis of technology and policy tradeoffs.** Journal of Energy Policy and Optimization, 2025.

PRAÇA, Eduardo Rocha. **Distribuição de gás natural no Brasil: um enfoque crítico e de minimização de custos.** Fortaleza – CE: Universidade Federal do Ceará, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, 2003.

PORTAL ENERGIA LIMPA. **BYD lança caminhão elétrico no Brasil por R\$ 589 mil.** 2025. Disponível em: <https://energialimpa.live/byd-lanca-caminhao-eletrico-no-brasil-por-r-589-mil/>. Acesso em: 5 maio 2025.

QUAN, Zhongyi et al. **A survey of powertrain technologies for energy-efficient heavy-duty machinery.** Proceedings of the IEEE, v. 109, n. 3, 2021.

QUATRO RODAS. **Gurgel Itaipu: há 46 anos, um brasileiro elétrico desafiava a gasolina.** 25 maio 2021. Disponível em: <https://quatorrodas.abril.com.br/carros-classicos/gurgel-itaipu-ha-46-anos-um-brasileiro-eletrico-desafiava-a-gasolina/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

RAJPER, S. Z.; ALBRECHT, J. **Electric vehicles and their impact on mining operations.** Energy Policy, v. 147, p. 111–122, 2020.

RAMOS, A. L. D. et al. **Atual estágio de desenvolvimento da tecnologia GTL e perspectivas para o Brasil**. Química Nova, v. 34, n. 10, p. 1704–1716, 2011. Disponível em: https://www.academia.edu/38444940/COMBUST%C3%8DVEIS_SINT%C3%89TICO_S_VIABILIDADE_NO_CEN%C3%81RIO_ATUAL_pdf. Acesso em: 19 maio 2025.

REIS, L.; FERRETTI, A. **Análise econômica e operacional dos caminhões elétricos no Brasil**. São Paulo – SP: Universidade Federal de São Paulo, 2024.

REIS, J. A.; SILVA, T. P.; ALMEIDA, C. R. **A implementação do gás natural veicular (GNV) em veículos**. Rio de Janeiro – RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.

REUTERS. **Amazon orders 200 new electric heavy trucks from Daimler for Germany, UK, 2024**. Disponível em: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/amazon-orders-200-new-electric-heavy-trucks-daimler-germany-uk-2025-01-13>. Acesso em: 3 mar. 2025.

REVISTA CULTIVAR. **Na Agrishow 2024, New Holland destaca tratores T4 Electric Power e T6.180 Methane Power**. 2025. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/na-agrishow-2024-new-holland-destaca-tratores-t4-electric-power-e-t6-180-methane-power>. Acesso em: 14 dez. 2024.

REVISTA MT. **A morte de um gigante**. 2025. Disponível em: <https://revistamt.com.br/Materias/Exibir/a-morte-de-um-gigante?Pagina=1&Pagina=1>. Acesso em: 1 maio 2025.

SACCO, Rafael Luis; FRIGO, Murilo Miceno. **The future of light-duty vehicles in Brazil: tendencies and challenges for a greener fleet.** Revista Brasileira de Energia, v. 29, n. 2, p. 160–168, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.47168/rbe.v29i2.783>. Acesso em: 16 jul. 2025.

SALES, J. V. **Hidrogênio verde: o que é, e sua relevância para o futuro.** Salvador – BA: Grupo de Sistemas Elétricos de Potência Integrados, Universidade Federal da Bahia, 2025. Disponível em: <https://www.gsepi.eng.ufba.br/hidrogenio-verde-o-que-e-e-sua-relevancia-para-o-futuro/>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SÁNCHEZ, José M^a Díaz. **La historia del tractor en el mundo.** 2024. Disponível em: <https://agriquipo.com/blog/tractores/wikitractor/la-historia-del-tractor-en-el-mundo/#:~:text=En%201892%2C%20John%20Froelich%20construy%C3%B3,%20mayor%20%C3%A9xito%20en%20Gran%20Breta%C3%B1a>. Acesso em: 23 out. 2024.

SANTOS, Roberto Amaral C. P. **Natural Gas Vehicles in Brazil: Consequences to Fuel Markets.** 2014. Dissertação (Mestrado em Economia) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getulio Vargas, São Paulo, 2014.

SCANIA_1a. **Especificação Técnica G460A6x2NA, TSR012, Rodoviário Gás.** 2024. Disponível em: <https://www.scania.com/br/pt/home/products/trucks/gas-truck/especificacoestecnicas.html>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SCANIA_1b. **Folheto Informativo sobre os Produtos a Gás.** 2024. Disponível em: https://materiais.solucoesSCANIA.com.br/site-lp-folhetos-caminhao-a-gas?utm_source=site_scania_brasil&utm_medium=site_scania_brasil&utm_id=site_scania_brasil. Acesso em: 19 abr. 2025.

SCANIA_1c. **Manual do Sistema de Gás.** Nov. 2024. Disponível em: https://www.scania.com/content/dam/www/market/br/pdfs1/Manual_Sistema_Gas_Novembro2024.pdf. Acesso em: 19 abr. 2025.

SEMIN, Rosli Abu Bakar. **A Technical Review of Compressed Natural Gas as an Alternative Fuel for Internal Combustion Engines.** American Journal of Engineering and Applied Sciences, v. 1, n. 4, p. 302–311, 2008.

SENAR – SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM RURAL. **Mecanização: operação de tratores agrícolas.** Brasília: SENAR, 2017.

SHAHEB, M. R. et al. **A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production.** Journal of Biosystems Engineering, v. 46, p. 417–439, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>. Acesso em: 14 jul. 2025.

SHELL BRASIL. **Shell realiza testes da primeira planta de hidrogênio renovável a partir do etanol. Universidade de São Paulo (USP).** 2025. Disponível em: <https://www.shell.com.br/imprensa/press-releases-2025/USP-realiza-testes-da-primeira-planta-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol.html>. Acesso em: 15 maio 2025.

SILVA, Elenice Rachid da. **Análise do crescimento da motorização no Brasil e seus impactos na mobilidade urbana.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SILVA, J. R. **Determinação da temperatura de cúpula do bico injetor de diesel em um motor dual fuel.** Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Belo Horizonte, 2025

SILVA, M. A. P. **Tendências e desafios na implementação de veículos elétricos no setor de transporte rodoviário de cargas.** Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2022.

SILVA, Úrsula Monteiro da. **Veículos elétricos: contribuições e impactos no setor energético.** Universidade Federal do Tocantins, Palmas – TO, 2020.

SILVESTRE, R. F. **Evolução dos veículos elétricos: da história movida aos motores de combustível fóssil ao futuro sustentável com o funcionamento dos motores elétricos.** Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales, v. 17, n. 4, p. 1–12, 2024.

SITE VW. **eDelivery.** 2025. Disponível em: <https://vwtpbpress.com/press/e-deliveryv>. Acesso em: 5 ago. 2024.

SITE “AMOCARROS”. **Entenda os benefícios da frenagem regenerativa para os veículos.** 2025. Disponível em: <https://amocarros.com.br/artigo/frenagem-regenerativa>. Acesso em: 10 mar. 2025.

SMITH, R. **Compressed Natural Gas Vehicles.** American Energy Institute, 2020.

STOPFER, N.; SOARES, A.; CASTRO, N. J. de; ROSENTAL, R. (Orgs.). **A mobilidade elétrica na América Latina: tendências, oportunidades e desafios.** Rio de Janeiro: E-papers Serviços Editoriais, 2021.

STEARNS, Peter N. **The industrial revolution.** Estados Unidos: ABC-CLIO, 1996.

SOUSA, L. M. S. S. **Potencial do Ceará para obtenção de hidrogênio verde via eletrólise da água residual através da energia eólica.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2022.

SOUZA, R.; BRAND, T. **Eficiência energética e sustentabilidade no transporte rodoviário: caminhões elétricos vs. diesel.** Revista Brasileira de Mobilidade Sustentável, v. 12, n. 3, p. 45–67, 2023.

SPEIRS, Jamie et al. **Natural gas fuel and greenhouse gas emissions in trucks and ships.** Progress in Energy, v. 2, n. 1, p. 012002, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/2516-1083/ab56af>. Acesso em: 14 jul. 2025.

SUN, R. **Systemic decarbonization of road freight transport: a comprehensive total cost of ownership model.** Estados Unidos: Oak Ridge National Laboratory, 2024.

THE SUN. **Toyota Mirai ganha desconto e reembolso nos EUA.** 2025. Disponível em: <https://www.the-sun.com/motors/14169989/toyota-mirai-discount-rebate/>. Acesso em: 6 maio 2025.

TRANSPORT POLICY. **EU: Heavy-duty: emissions.** Disponível em: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-heavy-duty-emissions/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

TRUCK1. **Tractor unit IVECO Stralis 400 NP, Gas LNG, Retarder.** 2024. Disponível em: <https://www.truck1.eu/tractor-units/iveco-stralis-400-np-gas-lng-retarder-a7530586>. Acesso em: 5 out. 2024.

TKT. **TKT solution for EV battery thermal management system**. 2025. Disponível em: <https://www.tkthvac.com/products/battery-cooling-system1/tkt-battery-thermal-management-system.html>. Acesso em: 1 ago. 2024.

TONON, Danielli Cecim da Silva. **Utilizando avaliação de ciclo de vida (ACV)**. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), 2020.

TÜV RHEINLAND. **Certificação de hidrogênio verde**. 2025. Disponível em: <https://www.tuv.com/landingpage/pt/hydrogen-technology/main-navigation/certification/certification-of-green-hydrogen/>. Acesso em: 11 abr. 2025.

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA (UDOP). **USP testa primeira estação de hidrogênio renovável produzido a partir do etanol para impulsionar a mobilidade sustentável no Brasil**. 2025. Disponível em: <https://www.udop.com.br/noticia/2025/2/21/usp-testa-primeira-estacao-de-hidrogenio-renovavel-produzido-a-partir-do-etanol-para-impulsionar-a-mobilidade-sustentavel-no-brasil.html>. Acesso em: 30 abr. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE), Energy Efficiency & Renewable Energy (EERE). **Using Natural Gas for Vehicles: Comparing Three Technologies**. Brochure 64267, 2015.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **Assessment of the Heavy-Duty Natural Gas Vehicle Market**. Washington, D.C., 2019.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP). **Aumento do número de veículos pesados usados contribui para a escalada da poluição, elevando a demanda por regulamentações mais rigorosas**. 2024. Disponível em: <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/aumento-do-numero-de-veiculos-pesados-usados>. Acesso em: 24 abr. 2025.

VALIANTE, D. **Análise de viabilidade técnica, econômica, ambiental e mercadológica da instalação original de fábrica de sistema de conversão para uso de gás natural em veículos leves movidos a gasolina e/ou álcool.** Dissertação (Mestrado) — Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3149/tde-26122014-174836/pt-br.php>. Acesso em: 19 maio 2025.

VEIGA, M. R. **Desenvolvimento do GNV.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

VELOSO, Norwil. **Revista MT: O século XIX: vapor e trilhos viabilizam a mecanização dos serviços.** 2013. Disponível em: <https://revistamt.com.br/Materias/Exibir/o-seculo-xix-vapor-e-trilhos-viabilizam-a-mecanizacao-dos-servicos?>. Acesso em: 1 abr. 2025.

THE VERGE. **Toyota shows off its latest big idea for cold hydrogen vehicles.** 2024. Disponível em: <https://www.theverge.com/2024/11/18/24299725/toyota-liquid-hydrogen-self-pressurizer-gr-corolla-h2>. Acesso em: 5 abr. 2025.

VEZA, Ibham et al. **Electric vehicle (EV) and driving towards sustainability: Comparison between EV, HEV, PHEV, and ICE vehicles to achieve net zero emissions by 2050 from EV.** Alexandria Engineering Journal, v. 82, p. 459-467, 2023.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **VW e-Delivery: O primeiro caminhão elétrico Volkswagen desenvolvido no Brasil.** 2023. Disponível em: <https://www.vwco.com.br/news/243>. Acesso em: 3 mar. 2025.

VOLVO GROUP. **Breakthrough: Volvo to launch electric truck with 600 km range.** 2024. Disponível em: <https://www.volvogroup.com/en/news-and-media/news/2024/sep/breakthrough--volvo-to-launch-electric-truck-with-600-km-range.html>. Acesso em: 3 mar. 2025.

VOLVO GROUP. **Volvo FH Electric recebe o prêmio Caminhão do Ano 2024.** Disponível em: <https://www.volvogroup.com/br/news-and-media/news/2023/nov/volvo-fh-electric-recebe-o-premio--caminhao-do-ano-2024-.html>. Acesso em: 3 mar. 2025.

VOLVO TRUCKS. **Volvo FH Electric excels in first road test.** 2022. Disponível em: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/stories/2022/jan/volvo-fh-electric-excel-in-first-road-test.html>. Acesso em: 3 mar. 2025.

VUKOVIC, Vladimir. **Reducing haul truck fuel consumption in open pit mines by strategic changes to the haulage cycle.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Queen's University, Kingston, 2013.

WERPY, M. R.; BURNHAM, A.; MINTZ, M.; SANTINI, D. J. **Natural Gas Vehicles: Status, Barriers, and Opportunities.** Technical Report ANL/ESD/10-4. Lemont (IL): Argonne National Laboratory, Energy Systems Division, August 2010. Disponível em: https://afdc.energy.gov/files/pdfs/anl_esd_10-4.pdf. Acesso em: 1 ago. 2025.

WOLSKI, M. et al. **Total Cost of Ownership for Heavy-Duty Electric Trucks in Mining.** International Journal of Mining Science and Technology, v. 31, n. 6, p. 933-944, 2021.

YAMASHITA, Leandro Massayuki Rolim. **Mecanização Agrícola.** Manaus: Instituto Federal Amazonas, 2010.

YOUNG, C. E. F.; MAC-KNIGHT, V. **Análise custo-benefício da substituição do diesel por gás natural veicular em ônibus na região metropolitana de São Paulo.** Revista de Economia Mackenzie, 2021. Disponível em: <https://editorarevistas.mackenzie.br/index.php/rem/article/view/1432>. Acesso em: 5 maio 2025.

ZARZUR, C. R. **GNV - Panorama geral do combustível.** Faculdade de Tecnologia de Botucatu (FATEC), Botucatu, SP, 2005.