



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO ELMO LIMA UCHOA FILHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE SIMULAÇÕES DE CAMINHÕES
HÍBRIDOS ELÉTRICOS COM AUTONOMIA ESTENDIDA (REEV)

FORTALEZA

2025

FRANCISCO ELMO LIMA UCHOA FILHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE SIMULAÇÕES DE CAMINHÕES
HÍBRIDOS ELÉTRICOS COM AUTONOMIA ESTENDIDA (REEV)

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Orientador: Prof. Dr. André Valente Bueno

FORTALEZA

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- U19a Uchoa Filho, Francisco Elmo Lima.
Análise de Desempenho e Emissões de Simulações de Caminhões Híbridos Elétricos com Autonomia Estendida (REEV) / Francisco Elmo Lima Uchoa Filho. – 2025.
87 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2025.
Orientação: Prof. Dr. André Valente Bueno.
1. Caminhão. 2. Híbrido. 3. Etanol. 4. Simulação. 5. Consumo energético específico. I. Título.
CDD 620.1
-

FRANCISCO ELMO LIMA UCHOA FILHO

ANÁLISE DE DESEMPENHO E EMISSÕES DE SIMULAÇÕES DE CAMINHÕES
HÍBRIDOS ELÉTRICOS COM AUTONOMIA ESTENDIDA (REEV)

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis

Aprovada em: 29 de Agosto de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Valente Bueno (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. José Antonio Andrés Velásquez
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

AGRADECIMENTOS

Início agradecendo aos meus pais. Por acreditarem que o conhecimento é o único bem que não lhe pode ser roubado. Graças ao seu esforço a geração seguinte pôde alcançar um nível de educação que não estava ao alcance da sua.

Agradeço também aos amigos e familiares que me apoiaram na aventura de sair de um trabalho e investir no mestrado. Foi uma jornada cheia de novas descobertas, reencontros, angústias compartilhadas, reuniões furadas, aniversários esquecidos, abraços virtuais, doenças superadas e concursos prestados. Sem os seus conselhos, suporte financeiro e emocional esta jornada não teria alcançado o seu desfecho atual.

Agradeço também à equipe do Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas pelas inúmeras ajudas prestadas, pelas discussões filosóficas dentro e fora do restaurante universitário, por ligar o computador nos momentos menos oportunos, por me ajudar a ver as soluções óbvias, pelos jogos passados e futuros no intervalo do almoço e pela amizade estabelecida. Agradeço ao meu orientador pelos ensinamentos formais, que foram muito, e também pelo conselhos acertados, que foram essenciais.

Por fim agradeço de forma especial à minha esposa Fernanda. O mestrado era somente um sonho, não fosse pela sua iniciativa de torná-lo realidade. Planejamos juntos esse mestrado, estudamos juntos, sofremos juntos, comemoramos juntos, e nos meses finais quando tudo dava errado você ficou ao meu lado e me deu o apoio que eu precisava para atravessar a tempestade.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

O agravamento da crise climática mundial demanda estratégias urgentes de mitigação dos impactos ambientais nos mais diversos campos de atuação humana. O setor de transportes é responsável por cerca de 23% de toda emissão mundial de CO_2 , e deste total 29,4% são originados em caminhões. Por outro lado poucas pesquisas são voltadas para este modal. Diante a tendência mundial para a adoção caminhões elétricos, avaliam-se as estratégias adotadas para as mais diversas realidades. O histórico brasileiro com biocombustíveis, em especial etanol, indicam para os veículos elétricos com autonomia estendida, *range extended electric vehicle* (REEV), como solução ideal para o país. Neste trabalho propõe-se um estudo do desempenho de diferentes conformações de caminhões com trem de potência — conjunto de componentes responsáveis pela propulsão do veículo — na configuração REEV. São propostos quatro modelos de caminhões, dois com carga máxima de 23t e dois com 57t, três níveis de potências para o motor a combustão operando etanol, combinados com até 17 grupos diferentes de bancos de baterias em paralelo. Para tanto, são desenvolvidos os modelos do trem de potência unidimensional na plataforma Realis Ignite com base em componentes e veículos comerciais. Em seguida, com o auxílio de rotinas desenvolvidas em linguagem *Python*, as diversas configurações de trem de potência são simuladas em sucessivos ciclos de condução normatizados. Ao final são selecionadas as combinações com menor consumo energético específico, com a melhor delas apresentando 0,633MJ/t.km. As emissões de dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono (CO) e hidrocarboneto não queimados (HC) foram avaliadas a critério das normas nacionais, equivalentes ao *Euro VI*, estando todas as simulações em conformidade.

Palavras-chave: caminhão; híbrido; etanol; simulação; consumo energético específico; emissões.

ABSTRACT

The worsening global climate crisis demands urgent strategies to mitigate environmental impacts in a wide range of human activities. The transport sector is responsible for around 23% of all global CO_2 emissions, and of this total, 29.4% comes from trucks. On the other hand, little research has been conducted on this transport mode. Given the global trend toward the adoption of electric trucks, the strategies adopted in many countries are evaluated. Brazil's history with biofuels, especially ethanol, indicates that range extended electric vehicles (REEV) are the ideal solution for the country. This work proposes a study of the performance of different truck configurations with power trains (the set of components responsible for propelling the vehicle) in the REEV configuration. Four truck models are proposed, two with a maximum load of 23t and two with 57t, three power levels for the ethanol-powered combustion engine, combined with up to 17 different groups of battery banks in parallel. Thus, one-dimensional powertrain models are developed on the Realis Ignite platform based on commercial components and vehicles. Aided by routines developed in Python, the various powertrain configurations are simulated in successive standardized driving cycles. The combinations with the lowest specific energy consumption are selected, being the minimum 0.633MJ/t.km. The emissions of CO_2 , NO_x , CO , and HC were evaluated according to national standards, equivalent to Euro VI, with all simulations being in compliance.

Keywords: truck; hybrid; ethanol; simulation; specific energy consumption; emissions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo conceitual da combustão <i>diesel</i> convencional no período quase equi- líbrio.	20
Figura 2 – Mapas de um motor 1.0 turbo para veículos compactos consumindo E28. . .	21
Figura 3 – Caminhos energéticos para tecnologias de transporte de baixo carbono. . .	32
Figura 4 – Mapas normalizados de motores elétricos veiculares compensados pela efici- ência dos conversores de tensão.	48
Figura 5 – Mapas do motor 1.0 turbo para veículos consumindo E100.	49
Figura 6 – Perfis de velocidade no tempo e elevação no tempo conforme o ciclo de condução WHVC, para as potências estudadas.	51
Figura 7 – Esquema de modelagem em blocos de dinâmica veicular de um caminhão elétrico REEV.	53
Figura 8 – Desempenho dos modelos em configuração BEV comparados com a biblio- grafia.	59
Figura 9 – Métricas de desvio de condução para todas as simulações de cada modelo. .	60
Figura 10 – Distância máxima percorrida pelas simulações de cada modelo.	62
Figura 11 – Variação do consumo específico de energia por tonelada-quilômetro com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para cada modelo.	63
Figura 12 – Variação do consumo específico de energia por tonelada-quilômetro com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para todos os modelos.	64
Figura 13 – Gráficos comparativos de consumo específico por autonomia útil para cada modelo REEV e BEV, e veículo <i>diesel</i>	65
Figura 14 – Variação da emissão específica de CO ₂ por tonelada-quilômetro com a quan- tidade de bancos de baterias em paralelo para todos os modelos.	66
Figura 15 – Variação das emissões de NO _x , CO e HC por unidade de energia com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para cada modelo.	68
Figura 16 – Perfil de velocidade de SOC da simulação A1.3.	71
Figura 17 – Perfil de velocidade de SOC da simulação A2.3.	72
Figura 18 – Perfil de velocidade de SOC da simulação B2.7.	72
Figura 19 – Perfil de velocidade de SOC da simulação B4.7.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos unidades tratoras	17
Tabela 2 – Composição do ar atmosférico padrão	18
Tabela 3 – Limites de emissões para <i>heavy duty vehicles</i> (HDV) em vigor nos Estados Unidos da América (EUA) e previstas para os próximos anos (ciclo de condução FTP).	26
Tabela 4 – Limites de emissões Euro para HDV em vigor e para os próximos anos, e limites em vigor para China e Brasil (ciclo de condução WHTC).	26
Tabela 5 – Principais ciclos de teste de validação de emissões para HDV em vigor.	28
Tabela 6 – Características do motor a combustão interna designado para as simulações.	43
Tabela 7 – Configurações de caminhão propostas para simulações de dinâmica veicular.	44
Tabela 8 – Cálculo da massa final, sem baterias, das configurações A1 e A2.	44
Tabela 9 – Cálculo da massa final, sem baterias, das configurações B2 e B4.	45
Tabela 10 – Características da bateria LG E66C.	46
Tabela 11 – Coeficientes para cálculo de resistência ao movimento.	50
Tabela 12 – Comparativo de desempenho dos REEV simulados com os dados da literatura.	64
Tabela 13 – Comparativo de emissões de CO ₂ dos REEV simulados com os dados da literatura.	67
Tabela 14 – Velocidades máximas dos veículos com melhor desempenho de cada modelo.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	<i>Advanced Clean Cars</i>
BEV	<i>battery electric vehicles</i>
BSS	<i>battery swapping stations</i>
CARB	<i>California Air Resources Board</i>
CO	monóxido de carbono
CO ₂	dióxido de carbono
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EUA	Estados Unidos da América
FCEV	<i>fuel cell electric vehicles</i>
FTP	<i>Federal Test Procedure</i>
GenAI	inteligências artificiais generativas
H ₂	gás hidrogênio
HC	hidrocarboneto não queimados
HDV	<i>heavy duty vehicles</i>
LDV	<i>light duty vehicles</i>
LHMT	Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas
MCI	motor a combustão interna
MEE	<i>Ministry of Ecology and Environment</i>
MP	material particulado
N ₂	gás nitrogênio
NO _x	óxidos de nitrogênio
nRMSE	<i>normalized root mean square error</i>
O ₂	gás oxigênio
O ₃	gás ozônio
PBT	peso bruto total
PCI	poder calorífico inferior
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
REEV	<i>range extended electric vehicle</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOC	<i>state of charge</i>
UE	União Europeia

VECTO	<i>vehicle energy consumption calculation tool</i>
WHTC	<i>World Harmonized Transient Cycle</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	Caminhões: conceitos e terminologias	16
2.2	Combustão e emissões	18
2.2.1	<i>Motores a combustão interna</i>	18
2.2.2	<i>Emissões em motores a combustão interna</i>	21
2.3	Legislações e Limites de Emissões	24
2.4	Ciclos de condução	27
2.5	Resistência ao movimento	29
3	SOLUÇÕES EM DESCARBONIZAÇÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1	Soluções na descarbonização de HDV	31
3.2	Análise do melhor vetor energético	34
3.3	Melhor estratégia para o Brasil	38
4	METODOLOGIA	42
4.1	Definição dos veículos modelados	42
4.2	Simulações	45
4.2.1	<i>Bancos de baterias</i>	46
4.2.2	<i>Motores elétricos</i>	47
4.2.3	<i>Mapas de ICE</i>	48
4.2.4	<i>Resistência ao movimento e relação de transmissão</i>	50
4.2.5	<i>Ciclo de condução</i>	50
4.3	Os modelos no Realis Ignite	51
4.4	Dados coletados	55
4.5	Estratégia de validação dos modelos	57
5	RESULTADOS	58
5.1	Validação	58
5.2	Conformidade das simulações	59
5.3	Desempenho	61
5.4	Emissões	66
5.5	Modelos com melhor desempenho	70

6	CONCLUSÕES	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A crise climática causada pelo aquecimento antrópico do planeta vem se agravando nas últimas décadas, demandando medidas urgentes de mitigação de seus efeitos (IPCC, 2023). Neste cenário o setor de transportes se destaca como responsável por cerca de 23% da emissão de CO₂ na geração global de energia (IEA, 2021). Já de acordo com ClimateWatch (2025) os três setores de transporte com maior emissão de CO₂ do planeta pertencem aos EUA, China e União Europeia (UE), responsáveis, respectivamente, por 21,8%, 12,7% e 10,0% dos valores globais em 2021. Neste mesmo ano o setor de transporte brasileiro foi responsável por 2,6% das emissões globais de CO₂, ocupando o 6º lugar entre os setores de transporte mais poluente.

Os HDV — denominação internacional que abrange caminhões e ônibus com peso bruto total igual ou superior a 3.500 kg —, apesar de representarem apenas 8% da frota mundial de veículos com mais de 3 rodas (IEA, 2024c), foram responsáveis, em 2024, por cerca de 35% das emissões diretas de CO₂ de todo o setor de transporte (IEA, 2024c), por cerca de 85% das emissões de NO_x e 63% de material particulado (MP) originadas de motores *diesel* em 2015 (Jin *et al.*, 2021). Os caminhões, em especial, são responsáveis por 29,4% das emissões de CO₂ de todo o setor de transportes (Ritchie, 2020).

Por outro lado, a robusta infraestrutura presente hoje de produção, distribuição e consumo de combustíveis fósseis em quase todos os países torna a sua total substituição uma tarefa virtualmente impossível dentro do tempo necessário para se mitigar impactos climáticos mais graves. A tendência atual sugere que até 2040 pelo menos 85% do transporte mundial ainda terá combustíveis fósseis como fonte primária de energia (Leach *et al.*, 2020). Além disso, conforme Murphy (2024) e Sugihara *et al.* (2024), diversos fatores sociais impedem que medidas mais ágeis e efetivas sejam tomadas na mitigação das mudanças climáticas.

Diante dessa realidade, regulamentações governamentais, tanto para HDV como *light duty vehicles* (LDV), vêm restringindo emissões de poluentes — tais como CO, NO_x, HC, MP, CO₂ —, taxando veículos com potencial de agravamento climático e subsidiando tecnologias capazes de reverter este cenário. A *Environmental Protection Agency* (EPA), agência de proteção ambiental do governo dos EUA, estabeleceu em 2016 os critérios de emissões para HDV *Phase 2*, com previsão para uma nova etapa em 2027 (EPA, 2025a). Já o *Euro VI*, instituído pela UE em 2014, tornou-se referência de controle de emissões de HDV em diversos países (como China e Brasil), e tem sua atualização para *Euro VII* prevista para 2029 (Williams; Minjares, 2016; Dornoff; Rodríguez, 2024; Egerstrom *et al.*, 2023). O Brasil, por sua vez, instituiu o Programa

de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE), que foi gradualmente se alinhando aos padrões *Euro*. Em vigor desde 2022, o PROCONVE P8 equivale ao *Euro VI* (CONAMA, 2018). Por outro lado, diversos países não adotam legislações que restrinjam as emissões de veículos fabricados ou importados, ou mesmo, muitos que adotam não as implementaram adequadamente até o momento (UNEP, 2024).

Apesar das restrições legislativas os HDV, e em especial os caminhões, exigem mais atenção de pesquisadores. As projeções para emissões dos modais de transporte de longa distância (aviação, naval e caminhões de médio e grande porte) apontam reduções muito mais lentas que para os demais modais (IEA, 2020; Jaramillo *et al.*, 2022). Esta constatação foi reforçada pelo adiamento das restrições do Euro VII, a despeito da pressão contrária do setor técnico-científico (Egerstrom *et al.*, 2023). O impacto econômico negativo foi apontado como um forte argumento do setor político e associações de fabricantes no adiamento das restrições para os HDV para o ano 2029 (Ryme, 2023). As restrições legislativas objetivando a redução dos impactos climáticos se tornam aos poucos incompatíveis com os limites da indústria do setor de transportes, o que, em consonância com a argumentação de Cullen *et al.* (2021) para o caso de células combustível, sugere a necessidade de maior engajamento de pesquisadores nos HDV em detrimento dos veículos leves: LDV.

Ainda que aquém do necessário, soluções para redução de emissões dos HDV vêm sendo propostas ao longo das últimas décadas. Diante de diversas legislações, hábitos e costumes, de diferentes disponibilidades de matéria-prima local ou em mercado internacional, o modelo de transição energética dos HDV deve ser avaliados para as realidades de cada região (Norris *et al.*, 2017). A realidade norte-americana aponta para uma predominância de *battery electric vehicles* (BEV), caso ocorra uma transição energética acelerada (ITF, 2023). Por outro lado, para o estado da Califórnia, as restrições em infraestrutura elétrica do país (OE, 2024) indicam um fortalecimento dos veículos elétricos de células a combustível, *fuel cell electric vehicles* (FCEV), consumindo gás hidrogênio (H₂) produzido por eletrólise (Kinnon *et al.*, 2020).

A descarbonização dos HDV na Austrália, conforme Hensher & Wei (2024), pode seguir por um caminho de baixo carbono — com uma renovação da frota do país para *Euro VI* —, de zero emissões — com a substituição da frota por BEV e FCEV —, ou mesmo pela combinações de ambos. Reitera-se que, para uma transição eficaz e acelerada, e considerados os impactos econômicos da transição sobre o setor privado de transporte de carga, a adoção contundente de uma única estratégia, independente de qual delas, torna-se o fator mais determinante.

Grinsven *et al.* (2021) e Slednev *et al.* (2022) analisam a viabilidade dos vetores elétrico e H₂, do ponto de vista de infraestrutura, para a realidade europeia, identificando robustez para a utilização do primeiro vetor e uma grande insuficiência para o segundo. Apesar da inviabilidade da hibridização dos HDV apontada por Norris *et al.* (2017) nas perspectivas de 2015, no início da década de 2020 diversas iniciativas se mostram promissoras. Para caminhões com percursos longo a combinação de motor *diesel* com eletrificação por baterias recarregadas por catenárias aéreas apresentou bom desempenho com redução em 50% nas emissões de gases de efeito estufa (Breuer *et al.*, 2021). O autor também aponta melhor desempenho de LDV em trechos urbanos se associado um BEV com a tecnologia de células a combustível.

Já no tocante à realidade chinesa, embora o país tenha implementado políticas de redução de emissões relativamente tarde, a influência estatal sobre a maior parte da indústria de fabricação de caminhões viabilizou uma rápida adequação da frota a padrões equivalentes ao EuroVI (Tan *et al.*, 2023). Por outro lado, a China segue de forma contundente investindo nos *new energy vehicles* — equivalentes aos BEV — na busca não só de um total descarbonização de sua frota, mas também, diante dos atuais cortes norte americanos em investimentos no setor, do domínio do mercado mundial de caminhões e ônibus elétricos (IEFFA, 2025; AsiaTimes, 2025). Além disso, a tecnologia de *battery swapping stations* (BSS), estações de troca de bancos de baterias, é vista como uma bem sucedida solução chinesa para viabilizar trajetos de longas para os HDV elétricos (Hao *et al.*, 2025; IEA, 2025b).

As pesquisas relacionadas à melhor desempenho dos HDV convencionais se diversificam entre melhorias na eficiência global dos veículos (Leach *et al.*, 2020), combustão combinada com outros vetores (Cai *et al.*, 2017), ou mesmo na total substituição do diesel por H₂ (Ampah *et al.*, 2024), gás natural ou biocombustíveis (Bueno *et al.*, 2011; Agarwal *et al.*, 2025). Jaramillo *et al.* (2022), por outro lado, apontam que pesquisas na melhoria da eficiência global dos caminhões *diesel* convencionais têm pouco potencial de redução de impactos climáticos. Já Norris *et al.* (2017) observaram que embora a substituição do óleo *diesel* por gás natural tenha um grande potencial de redução de emissões de NO_x e seja economicamente competitivo, não se observa grande impacto nas emissões de CO₂. Além disso, há de se ressaltar que diversas fontes indicam uma imaturidade das tecnologias de produção, armazenamento e distribuição de H₂, o que inviabiliza este vetor como solução a curto e médio prazo (Ampah *et al.*, 2024; Agarwal *et al.*, 2025; Grinsven *et al.*, 2021; Kinnon *et al.*, 2020; Breuer *et al.*, 2021; Jaramillo *et al.*, 2022).

O Brasil, por outro lado, apesar dos investimentos em mobilidade menos poluente

(Brasil., 2023) ainda possuir uma frota de caminhões predominantemente *diesel*, e com idade média de cerca de 21 anos (Abipeças; Sindipeças, 2025). Apesar da inclinação do país para caminhões tipo BEV (FENABRAVE, 2024), não observa-se no país investimento nas infraestruturas necessárias para viabilizar a utilização deste vetor em larga escala. Por outro lado o forte histórico brasileiro com desenvolvimento, experimentação e implantação de veículos abastecidos com etanol (Santos, 2018) indica um caminho a ser trilhado.

Conforme IEA (2024a) o etanol pode ser um dos biocombustíveis com o menor potencial para emissão de gases estufa, desde que considerados os impactos provenientes de mudanças no uso do solo para o cultivo de cana-de-açúcar. Tecnologias de manejo de resíduos na produção do etanol ou no seu processo de co-produção com o açúcar podem reduzir drasticamente o potencial poluente do biocombustível (Nogueira *et al.*, 2008; Dias *et al.*, 2015).

Diante disto uma combinação de BEV com motor a combustão movido a etanol pode ser o perfil ideal de descarbonização de caminhões brasileiros. A tecnologia de REEV, que já é comercial para LDV (BMW, 2025), consiste em BEV com autonomia estendida através da recarga via motor a combustão interna (MCI) associado ao sistema. Pesquisas avaliando o desempenho de REEV consumindo etanol são promissoras, embora sejam poucas e se limitem a veículos leves (Dias *et al.*, 2024; Weissinger *et al.*, 2025).

Existe, portanto, um potencial inexplorado de aprofundamento na viabilidade de HDV com tecnologia REEV voltado para a realidade energética brasileira. O estudo unidimensional da dinâmica veicular é uma etapa importante na validação de novas tecnologias de mobilidade. Este é, portanto, o caminho ideal para que seja feita uma primeira análise de viabilidade dos caminhões REEV.

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar a viabilidade da tecnologia de REEV consumindo etanol para o modal caminhão. Para tanto, faz-se uma revisão bibliográfica com o intuito de validar teoricamente a proposta. Em seguida são desenvolvidos 4 modelos diferentes de caminhão no software de simulação de dinâmica veicular *Ignite*. Cada modelo é simulado com 17 diferentes configurações de bacos de baterias em paralelo. A viabilidade da proposta é analisada contrastando-se desempenho dos veículos simulados, em termos consumo energético específico, com valores de referência da literatura. Além disso também é avaliado potencial de redução de emissões dos modelos, comparando-se o seu desempenho com os limites legais nacionais e internacionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos e teorias exploradas nos capítulos seguintes. Inicialmente faz-se necessária uma conceitualização de HDV e das principais características e terminologias que permeiam esta linha de estudo. Em seguida são pontuados conceitos básicos de um MCI e da combustão que neles ocorre buscando explicar a formação dos principais gases poluentes emitidos por este tipo de motor.

Na sessão seguinte são revisadas as trajetórias das legislações de controle de emissões dos principais poluentes do mundo, juntamente com a trajetória brasileira neste quesito. Em seguida abordam-se os ciclos de teste e condução padronizados para controle de emissões. A sessão final deste capítulo explicam as forças de resistência ao movimento em veículo.

2.1 Caminhões: conceitos e terminologias

Em CONTRAN (2022), seguindo os mesmo critérios internacionais para os HDV, é estabelecido que veículos pesados são todos aqueles que possuem um peso bruto total (PBT) — soma da tara (peso do veículo sem carga) com a lotação (carga máxima que pode transportar) — superior a 3.500kg. O conceito abrange caminhões, ônibus e tratores. Os caminhões, de forma mais abrangente, são os veículos rodoviários destinados ao transporte de carga. Hoje os caminhões são extremamente relevantes no setor de transportes mundial, sendo responsáveis por cerca de 23% de todo o transporte de cargas na UE (Eurostat, 2025), 64% nos EUA (BTS, 2024), 74% na China (IBISWorld, 2024) e 65% no Brasil (CNT,).

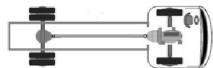
Em termos de morfologia, são considerados caminhões fixos, ou não articulados, os veículos cuja unidade geradora de tração e de transporte de carga compartilham o mesmo chassi. Já os veículos articulados, em geral, contam com uma unidade tratora independente, chamada de caminhão-trator ou cavalo mecânico, acoplado a veículos sem capacidade tratora que contém a carga transportada, reboque ou semi-reboques. Os reboque são veículos não tratores de transporte de carga que suportam todo o peso da carga sobre os próprios eixos, sendo portanto só engatados a um caminhão (fixou ou cavalo mecânico). Os semi-reboques, por outro lado, suportam só parte do peso da carga sobre seus eixos, sendo necessariamente acoplados a um cavalo mecânico — ou a um outro semi-reboque específico para esta aplicação — sobre o qual deposita a parcela restante do peso da carga.

Os caminhões também são identificados com relação a quantidade de eixos totais

e eixos com tração em seu chassi. A designação usual faz, na verdade alusão à quantidade de pontas de eixo totais em relação às tratoras. Um caminhão 4x2, por exemplo, possui 4 pontas de eixo no total, sendo duas tratoras, ou, em outras palavras, 2 eixos no total, sendo 1 deles trator. É comum que caminhões utilizem mais de dois pneus em um mesmo eixo com o intuito de aumentar a carga máxima suportada pelo mesmo, no entanto a designação permanece independente da quantidade de pneus. Desta forma, um caminhão com dois pneus no eixo dianteiros (direcional) e quatro, seis, ou até mesmo oito pneus em um único eixo trator também seria designado 4x2.

A Tabela 1 ilustra os três principais tipos de unidades tratoras, podendo esta classificação ser aplicada tanto a caminhões fixos como cavalos mecânicos. Além do expresso pela tabela, também existem veículos com mais de três eixos, com tração em mais de dois eixos, com mais de um eixo direcional, mas nenhum destes está no escopo deste trabalho. O aumento na quantidade de eixos tratores tem o intuito de elevar o coeficiente de atrito entre as rodas e o solo quando o veículo está superando algum declive, de modo que as configurações excluídas da Tabela 1 são típicas de aplicações fora de estrada.

Tabela 1 – Principais tipos unidades tratoras

Nome Usual	Designação	Eixos com tração	Total de eixos	Esquema
Toco	4X2	1	2	
Trucado	6X2	1	3	
Traçado	6X4	2	3	

Fonte: Ilustrações adaptadas de Melo (2019)

Já em termos de dimensões e carga, em CONTRAN (2021) são estabelecidos limites legais de dimensões e pesos dos veículos terrestres brasileiros, restringindo-se também a carga máxima permitida por eixo ou conjunto de eixos. A norma estabelece um limite máximo de 19,8m, 57t e 7 eixos para uma combinação de veículos para transporte de carga (caminhão trator combinado com um ou mais semi-reboques), sem que seja necessária uma autorização especial de trânsito. Veículos fixos são restritos a um máximo de 14m e 29t, porém, se consideradas as restrições de carga por eixo ou par de eixos, uma configuração comum de caminhão fixo 6x2 ou 6x4, com 2 pneus no eixo dianteiro (máximo de 6t) e 4 pneus em cada eixo traseiro (máximo de

17t), seria limitada a 23t.

2.2 Combustão e emissões

Os motores a combustão interna operam, de forma simplificada, utilizando a energia proveniente da combustão para a expansão de gases que movimentarão um pistão cujo movimento é transmitindo para um eixo rotativo. Desta forma, o modo com a combustão se dá, em todos os tipos de motores, é um fator crucial para um melhor aproveitamento a energia liberada e redução de componentes indesejados dentre os resultantes.

2.2.1 Motores a combustão interna

A reação de combustão, sempre decorrente de um mistura de combustível e oxigênio, é composta, na verdade, de diversas reações que ocorrem de forma simultânea ou desencadeada. Na combustão do gás metano (CH_4) com gás oxigênio puro, por exemplo, são estimadas cerca de 130 reações elementares, simplificadas para 27 espécies de reações. Por outro lado, frequentemente o oxigênio utilizado na combustão é proveniente do ar atmosférico, de modo que a reação de combustão se dá na presença de outros gases, o que inevitavelmente resulta em cerca de 7 novas espécies de reações(Zhang *et al.*, 2023).

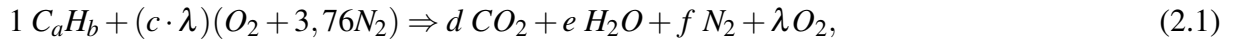
No estudo teórico da combustão combustível-ar são feitas diversas considerações, dentre as quais está o padrão de ar seco de referência como descrito na Tabela 2, que pode, ou não se acrescido de vapor de água, conforme requerido pelo estudo. No entanto, para efeitos de equacionamento químico geral, pode-se considerar o gás oxigênio, como elemento mais reativo, como 21% do ar, ao passo que os demais componentes, sendo quimicamente inertes ou de baixo impacto químico, são englobados pela composição do gás nitrogênio, que torna-se, portanto, 79%.

Tabela 2 – Composição do ar atmosférico padrão

Gás	Percentual [$kmol_{gás}/kmol_{ar}$]
N_2	78,08%
O_2	20,95%
Ar	0,93%
CO_2	0,04%
Ar Seco	100%

Fonte: Heywood (2018)

Desta forma, uma reação global de combustão ideal de um hidrocarboneto de composição H_aC_b , pode ser escrita como:



onde λ representa o excesso de oxigênio da reação. De modo que, ao se balancear a equação, tem-se:

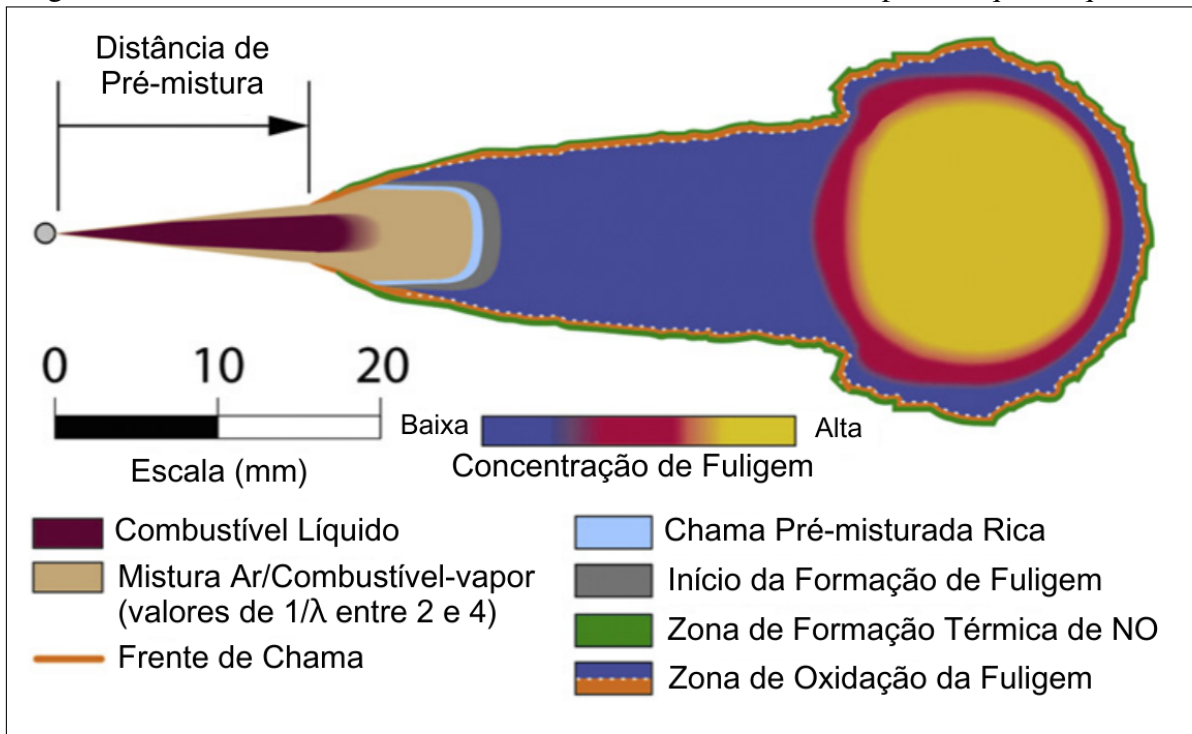
$$d = a, e = \frac{b}{2}, c \cdot \lambda = a + \frac{b}{4}, f = 3,76 \cdot \left(a + \frac{b}{4}\right) \quad (2.2)$$

O excesso de ar é um fator preponderante em diversas estratégias de combustão. Queimadores industriais operando em regime quase permanente podem apresentar estratégias de combustão — com pré-mistura, ou estratificadas, com combustíveis líquidos ou gasosos, com fluxo cruzado ou não — que podem injetar diferentes concentrações de combustível estratificadas na mesma chama (Rahimi *et al.*, 2023) e operar convencionalmente com valores λ entre 0,5 e 50 (Baukal, 2004). Devido à sua diversidade e versatilidade os queimadores industriais se apresentam como vetor mais propício para a combustão de gás hidrogênio como fonte renovável de energia (Uchoa Filho *et al.*, 2025). Já em motores ciclo *diesel* a combustão se dá com valores de λ entre 18 e 80 (Ganesan, 2012).

Em motores comuns a ignição por centelha (IC) existe uma prévia mistura do ar com o combustível, com o intuito de comprimir-se dentro do cilindro uma mistura quase homogênea, com valores de λ próximos de 1. A combustão é então iniciada através do centelhamento da vela, e uma frente de chama é então propagada daquele ponto até consumir a quase totalidade da mistura. Já em motores a ignição por compressão (*diesel*) o ar é comprimido no cilindro a taxas entre 16 : 1 e 20 : 1 — muito superiores às 6 : 1 a 10 : 1 exercidas em motores IC — de modo que o combustível, quando injetado, entra em ignição, desenvolvendo uma chama em formato de pluma com regiões de valores diferentes de λ e propriedades distintas, conforme detalhado na Figura 1.

A operação de motores a combustão em veículos automotores é frequentemente submetida a demandas diversas, como por exemplo quando o veículo demanda maiores toques em declives, ou maiores rotações em ultrapassagens. A combinação entre torque e rotação é então utilizada como forma de mapear as diversas condições de operação do motor. Na Figura 2 são apresentados mapas de consumo específico de combustível, emissões de CO , NO_x e HC de um motor 1.0 turbo para veículos compactos abastecido com E28, em estudo no Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas (LHMT). Nos mapas a grandeza "Demanda" representa

Figura 1 – Modelo conceitual da combustão *diesel* convencional no período quase equilíbrio.

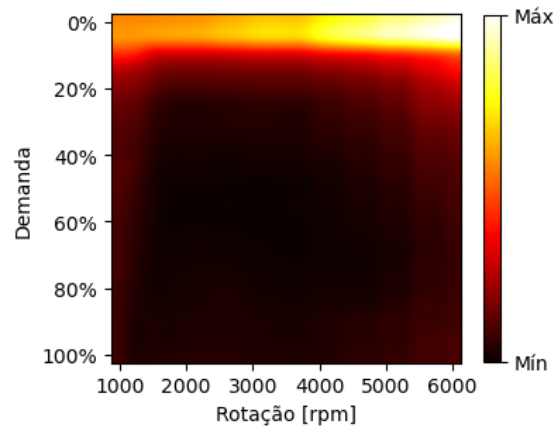


Fonte: Traduzido de Musculus *et al.* (2013).

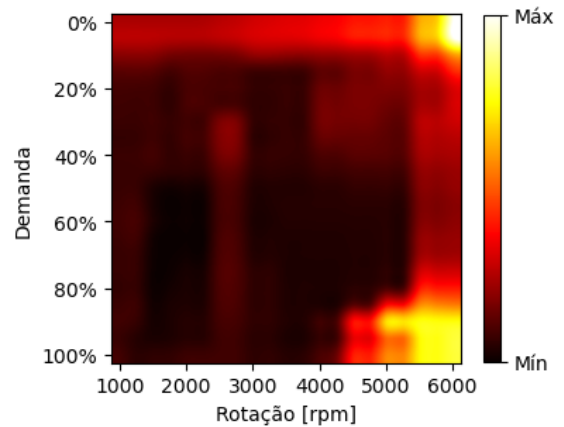
o percentual do torque máximo para cada rotação. Um mesmo motor pode apresentar mapas diferentes em calibrações distintas e operando com diferentes combustíveis. Com o levantamento dos mapas em uma determinada condição é possível perceber o seu comportamento em termo de consumo de combustível e emissões ao longo de um ciclo de testes. Por questão de sigilo dos dados fornecidos pelo fabricante é necessário que se omitam os valores correspondentes às cores dos mapas.

Pelo mapa da Figura 2a pode-se ver que condições em que se exija uma demanda inferior a 10% o veículo demandará quantidades superiores de combustível, principalmente em altas rotações. Observa-se um comportamento semelhante em Figura 2b e Figura 2c, embora observe-se um tendência para menores emissões de CO em rotações próximas a 2000 rpm, ao passo que menores emissões de HC são encontradas com demandas superiores a 90% e rotações entre 2000 rpm e 5000 rpm. Já os NO_x , mapeados na Figura 2d, tendem a elevados valores com demandas superiores a 40% e rotações superiores a 3000 rpm (embora se observe um pico de emissões com altas rotações e demandas abaixo de 10%). É importante ressaltar que não existe região ideal em que se obtenha consumo mínimo e baixas emissões em todos os mapas. Além disso, quando em uso corriqueiro, o motor está frequentemente transitando entre regiões indesejadas, para um ou até todos estes fatores. Neste contexto, os motores a combustão são projetados e regulados de modo a se obter mapas que melhor se adequam às diversas condições

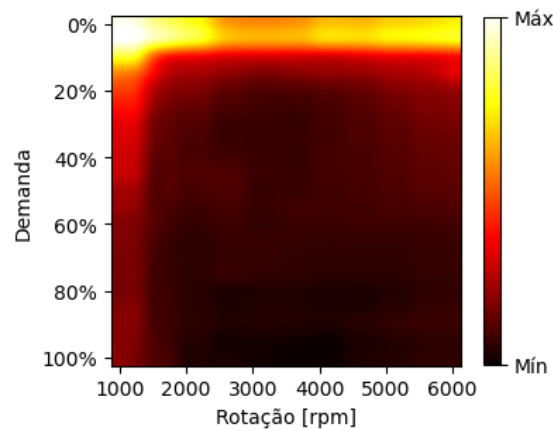
Figura 2 – Mapas de um motor 1.0 turbo para veículos compactos consumindo E28.



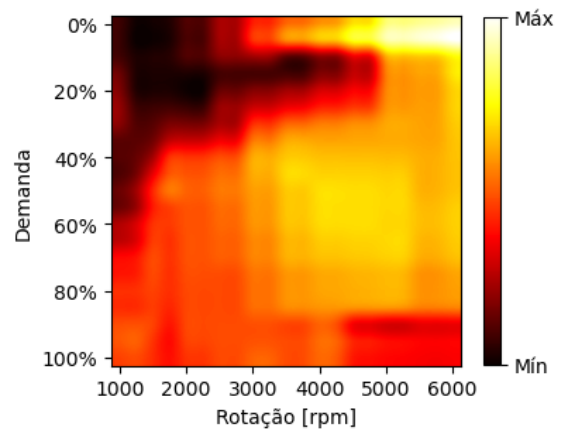
(a) Mapa de consumo de combustível.



(b) Mapa de emissões de CO.



(c) Mapa de emissões de HC.



(d) Mapa de emissões de NOx.

Fonte: Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas - UFC

de uso de um veículo.

2.2.2 Emissões em motores a combustão interna

Motores de ignição por compressão, *diesel*, tendem a uma eficiência de conversão de combustível em torno de 98%, indicando que 2% do combustível não é queimado, ou é parcialmente queimado durante a combustão (Ganesan, 2012). Devido à sua não uniformidade característica, a combustão *diesel* tende a estratificar mais explicitamente as etapas da combustão, de modo que diversas das reações parciais podem ocorrer em regiões específicas da chama, conforme explicitado na Figura 1. Desta forma, em situações de demandas adversas, é frequente uma queima incompleta do combustível, portanto este tipo de motor tende a gerar uma taxa maior de espécies químicas de etapas parciais da combustão, principalmente de hidrocarbonetos,

nos gases de exaustão.

Motores *diesel* também têm uma tendência maior a geração de MP. O MP decorre da fuligem, composta por esferas de carbono sólido geradas nas regiões ricas em combustível da chama, quando não completamente oxidada em CO ou CO₂. Nas etapas frias posteriores à combustão a fuligem detém em sua superfície condensados de hidrocarbonetos não queimados chamados de fração orgânicas solúveis (FOS) (Braun *et al.*, 2003). As esferas de carbono recobertas pela FOS aglomerando-se e geram o MP, que pode ter de 3% a 50% da sua massa composta por hidrocarbonetos a depender das características da combustão (Ganesan, 2012).

Já os motores IC, que operam em ciclo de combustão *Otto*, apresentam uma eficiência de conversão de combustível em torno de 98,5% (Ganesan, 2012), portanto, em relativa menor quantidade quando comparados aos motores *diesel*. Devido à uniformidade da combustão resultante da pré-mistura ar-combustível, estes motores não apresentam quantidades consideráveis de MP, porém o contato da frente de chama com as paredes do cilindro, bem como eventuais disfunções na combustão podem gerar fuligem agregada às paredes do cilindro e do cabeçote. Esta fuligem tem igual capacidade de retenção de hidrocarbonetos, impedindo-os de participar completa ou parcialmente da combustão. Na etapa de exaustão dos gases do cilindro os HC são liberados no fluxo enquanto a fuligem permanece impregnada à parede repetindo ciclo. Porém a maior parte das emissões de HC em motores IC se deve às arestas acentuadas na câmara de combustão ou à reentrância formada entre o pistão e as paredes do cilindro, que por ser muito estreitas ou formar regiões de recirculação de gases, dificultam a propagação da chama, preservando parte dos hidrocarbonetos de uma combustão completa (Heywood, 2018).

O monóxido de carbono CO é um produto incompleto da combustão, e extremamente indesejado, por ser venenoso. A formação do CO se dá principalmente em situações de combustão rica em combustível, onde não se tem gás oxigênio suficiente para completar a formação do CO₂. A sua formação em motores *diesel* não é muito representativa, mas em motores IC estima-se que componha de 0,2% a 5% dos gases de exaustão. Para além das situações de operação adversas onde se exige um combustão com $\lambda < 1$, misturas ar-combustível deficientes, ou combustões incompletas, como descritas na formação dos HC, são propícias à formação de CO, mesmo em proporções estequiométricas (Ganesan, 2012).

Em motores a combustão a presença do enxofre — tanto na gasolina (150 500ppm) como no *diesel* (5500ppm) (Ganesan, 2012) — resulta na formação tanto de SO₂ como SO₃, elementos de grande preocupação, por gerarem o fenômeno da chuva ácida. Porém, por não

se tratar de um elemento essencial para a combustão, mas sim um contaminante, a melhor estratégia para lidar com o problema é a redução do seu teor durante o processo de refino dos combustíveis, especialmente para o caso do *diesel*. Diante de regulamentações no teor de enxofre nos combustíveis para valores inferiores a 10ppm (Heywood, 2018) em diversos países nas últimas décadas, hoje as emissões de óxidos de enxofre foram reduzidas a uma escala de menor preocupação, quando comparadas às demais.

O gás nitrogênio (N_2) é o gás com maior composição no ar atmosférico, e acarreta grande preocupação quando presente em processos que envolvem combustão. A energia liberada na combustão frequentemente é capaz acionar reações de oxidação do N_2 , formando NO , NO_2 , NO_3 e N_2O , conhecidos como gases NO_x . A formação deste óxidos é de grande preocupação devido ao seu impacto direto à saúde humana (Taha *et al.*, 2025), em especial nos centros urbanos. Os NO_x são um componente contante e de grande importância nas normas mundiais de regulação de emissões.

Na década de 1990 diversas pesquisas foram empreendidas na tentativa de entender o mecanismo de formação dos NO_x em motores a combustão interna de ciclo diesel (Donahue *et al.*, 1994; Schulz *et al.*, 1996; Flynn *et al.*, 1999). As pesquisas de Dec & Canaan (1998), em especial, trouxeram perspectivas muito claras da relação entre a formação de NO_x e a temperatura da chama, evidenciando a tendência à sua formação na periferia da chama (Figura 1), onde se tem também grande disponibilidade de gás oxigênio (O_2). Dec & Canaan (1998) também avalia que cerca de 65% do NO_x é gerado durante os picos de liberação de energia da combustão, enquanto os 35% restantes seriam resultantes da oxidação dos gases quentes remanescentes, antes do resfriamento proveniente da etapa de expansão do cilindro.

Os mecanismos de formação e degradação dos NO_x em motores IC se dão de forma semelhante. As altas temperaturas e grande disponibilidade de O_2 na frente de chama propiciam a formação dos óxidos de nitrogênio. A literatura (Ganesan, 2012; Heywood, 2018) ressalta relativa equivalência nas proporções de emissão de NO_x para motores IC e *diesel*. Além disso, conforme mostrado por Iodice *et al.* (2021), de uma forma geral o etanol hidratado, quando adicionado à gasolina, leva a uma proporcional redução dos NO_x . Porém, quando a mistura é submetida a elevadas taxas de compressão observa-se uma elevação na produção de NO_x .

2.3 Legislações e Limites de Emissões

As primeiras iniciativas de se desenvolver limitações nas emissões de veículos surge como uma preocupação com a qualidade do ar, principalmente nos grande centros urbanos. Já em 1955 os EUA estabeleceram sua primeira lei federal visando o controle de emissões de veículos automotores, o *Air Pollution Control Act*. Com o *Clean Air Act* de 1990, a EPA —fundada em 1975 — estabeleceu limites para emissões de HC, CO, NO_x e MP a ser implementados a partir de 1994 (EPA, 2024). As normas para LDV, nomeadas *Tier*, foram sendo atualizadas com restrições mais severas, passando pela adoção da *Tier II* em 2004, da *Tier III* em 2017 (atualmente em vigor), até a *Tier IV* que será posta em vigor a partir de 2027 (EPA, 2025a). Para HDV, as normas EPA *Phase 2* estão em vigor desde 2016, porém com previsão de que a *Phase 3* seja estabelecida já em 2027 (EPA, 2025b).

O estado norte americano da Califórnia, por sua vez, adquiriu o direito de legislar por conta própria as emissões de veículos através da *California Air Resources Board* (CARB). Em 2012 foi instituído o pacote de normas *Advanced Clean Cars* (ACC) I, com critérios de emissões e padrões para veículos de baixa emissão (LEV) e de zero emissão (ZEV). Já em 2022 foram estabelecidas as normas ACC II, com a ambição de alcançar emissões nulas no estado até 2035. As normas estabelecidas pela CARB são, de modo geral, mais ambiciosas que as federais, sendo permitido a outros estados escolher qual das normas pretende referenciar em suas fiscalizações (CARB, 2025).

Já União Europeia estabeleceu o padrão de emissões Euro 1 e I em 1992, que, com atualizações frequentes ao longo dos anos, traçou limites, em geral ainda mais restritivos que a EPA durante as décadas de 1990 e 2000. As normas europeias para LDV são identificadas com algarismos indo-arábicos (1, 2, 3, 4, etc) enquanto as normas para HDV utilizam algarismos romanos (I, II, III, IV, etc). O Euro 7, em vigor desde 05 de julho de 2025 já conta com normas relacionadas ao desgaste de pneus e à vida útil das baterias de veículos elétricos (Dornoff; Rodríguez, 2024). Já categoria de veículos pesados segue atendendo aos padrões Euro VI, com previsão de atualização para a sétima etapa da norma europeia somente em 2029 (Egerstrom *et al.*, 2023).

Embora somente 18% da energia utilizada pela China seja proveniente de combustíveis fósseis, este montante em 2023 foi de cerca de 31 TJ, equivalente a 2,4 vezes toda a energia consumida pelo Brasil no mesmo ano (IEA, 2025c). A enorme matriz energética do país asiático tem suas emissões controladas pelo *Ministry of Ecology and Environment* (MEE), que instituiu, a

partir de 2000, etapas de redução de emissões para LDV e HDV. Embora todas as fases anteriores do programa chinês tenham seguido os padrões Euro, as restrições atuais China 6-b (para LDV) e China VI-b, em vigor desde 2023, são um pouco mais restritivas que a sexta etapa do padrão europeu (He; Yang, 2017; Yang; He, 2018). Há de se ressaltar ainda que, devido à estrutura de estado chinesa a implantação de padrões de emissões para a indústria nacional ocorre de forma mais rápida que nos demais grandes poluidores do planeta, a exemplo da frota nacional de HDV, que sendo em maior parte administrada pelo estado, recebeu grandes investimentos estatais na sua adequação à China VI-b (Tan *et al.*, 2023).

O Brasil, instituiu ainda em 1986 o PROCONVE com o objetivo de melhoria da qualidade do ar nos centros urbanos, mas inicialmente sem limites claros com relação às emissões de poluentes. As etapas seguintes do PROCONVE foram se alinhando aos padrões Euro, porém com nomenclatura própria, sendo "MAR referente a máquinas agrícolas e rodoviárias, "M" a motocicletas, ciclomotores e similares, "L" a veículos automotores leves, e "P" a pesados. As etapas em vigor do PROCONVE são M5 (iniciada em 2023), P8 (2023) e L8 (2025), com padrões de emissões equivalentes ao Euro 6 e VI. As normas MAR-1 em vigor desde 2015, diferente das demais, seguem os critérios da *Tier 3* norte americana.

A Tabela 3 apresenta os limites de emissões vigentes e que entrarão em vigor em um futuro próximo para HDV nos EUA, tendo como referência o ciclo de condução *Federal Test Procedure* (FTP), que representa condições reais de condução de HDV em ambiente urbano e vias expressas dos EUA. A Tabela 4 apresenta os limites para os demais países citados e os novos limites que previstos para a UE nos próximos anos, todos com base no ciclo de condução *World Harmonized Transient Cycle* (WHTC), desenvolvido com base em condições típicas de condução europeias, norte americanas, japoneses e australianas. Um vez desenvolvidos a partir de ciclos de teste diferentes, os limites de emissões listados nestas tabelas são parcialmente comparáveis, visto que as emissões de um veículo submetido a ambos os testes será invariavelmente diferente para cada um.

Fica claro na comparação entre as tabelas uma menor quantidade de poluentes limitados pelas normas norte americanas, o que pode se justificar no plano traçado pela EPA, em especial a californiana, que consiste em uma conversão severa da frota para veículos com emissões nulas. Além disso as restrições norte americanas são muito mais severas para emissões de NO_x e MP, visando, a curto prazo, uma melhor qualidade do ar nos centros urbanos. Por outro lado, as normas europeias, e as nela baseadas, apresentam restrições para nove poluentes,

Tabela 3 – Limites de emissões para HDV em vigor nos EUA e previstas para os próximos anos (ciclo de condução FTP).

Origem		EUA		Califórnia	
Norma		Phase 2	Phase 3	2024-2026	2027 +
Implantação		2016	2027	2024	2027
CO	[mg/kWh]	20.786	8.046	20.786	20.786
HC	[mg/kWh]	188	80	188 ^a	188 ^d
NO _x	[mg/kWh]	268	47	67	27
MP	[mg/kWh]	13,4	6,7	6,7	6,7

Fonte: Adaptado de DieselNet (2025a)

a: Hidrocarbonetos não-metano

Tabela 4 – Limites de emissões Euro para HDV em vigor e para os próximos anos, e limites em vigor para China e Brasil (ciclo de condução WHTC).

Origem		UE		China	Brasil
Norma		Euro VI	Euro VII	China VI-b	P8
Implantação		2014	2029	2023	2023
CO	[mg/kWh]	4000	1500	4000	4000
HC ^a	[mg/kWh]	160	-	160	160
NMOG ^b	[mg/kWh]	160	80	160	160
CH ₄ ^b	[mg/kWh]	500	500	500	500
NO _x	[mg/kWh]	460	200	460	460
NH ₃	ppm	-	10	10	10
MP	[mg/kWh]	10	8	10	10
NP ₁₀ ^c	[partículas/kWh]	$6,0 \cdot 10^{11}$	$6,0 \cdot 10^{11}$	$6,0 \cdot 10^{11}$	$6,0 \cdot 10^{11}$
N ₂ O	[mg/kWh]	-	200	-	-

Fonte: Adaptado de DieselNet (2025a)

a: Para motores Ciclo *Diesel*.

b: Para motores Ciclo *Otto*.

c: Contagem de partículas até 10nm.

forçando um investimento muito maior de pesquisadores e fabricantes do setor em um controle mais abrangente da combustão e tratamento dos gases por ela gerados. Além disso já são traçados planos de controle de desgaste de pneus e de vida útil de baterias.

Para além dos valores expostos, cada norma estabelece padrões de emissões para testes específicos, como NTE(*Not-To-Exceed*) para as certificações norte americanas e brasileiras, e o ciclo WHSC para a europeia. Além disso, ambas as normas definem limites de emissões que devem ser monitorados em tempo real por todos os veículos pelo através do seu sistema de diagnóstico de bordo, OBD (*on-board diagnostics*). Um vez excedido o limite estabelecido por norma o OBD deve emitir um sinal de alerta avisando ao motorista sobre o mal funcionamento do sistema para que o veículo seja encaminhado para uma oficina. A China planeja um controle ainda mais severo, obrigando que os OBD estejam em comunicação periódica com uma central de controle governamental, reportando as condições de operação do veículo. Tal sistema de

controle inclui medidas de limitação compulsória da potência e de velocidade do veículo — para um máximo de 25% de torque e de 20km/h — caso o motorista persista na operação do veículo em condições fora de norma (Yang; He, 2018).

Por fim deve-se ressaltar que ambas as estratégias de redução de emissões, tanto norte americana quanto europeia, são válidas para os veículos vendidos nos países que as adotam a partir da data de vigência, uma vez que não é possível que se fiscalize a emissão de veículos já em operação. Desta forma ambas também contam com projeções de vida útil dos veículos, e de degradação dos sistemas, restringindo o quanto os padrões homologados em fábrica podem se degenerar para fora do limite desejado de emissões.

2.4 Ciclos de condução

Conforme aprofundado na seção 2.3, diversos países implementaram normas com limites de emissões para veículos comercializados em seus territórios. Assim, a homologação de veículos, no que tange às normas de emissões de poluentes, depende de testes padronizados realizado nos motores e nos veículos. Nos teste de motores, independentes do restante do veículo, estes têm o seu eixo de potência acoplado diretamente a um equipamento chamado dinamômetro de bancada, de modo que, quando submetido a diferentes condições, as grandezas avaliadas, juntamente com torque, rotação e potência são registradas. Já no teste de veículos, estes são montados sobre um dinamômetro de rolos (ou de chassi), que mede o desempenho do veículo através de pares de rolos posicionados sob cada pneu do veículo.

Visando uma padronização nos testes para validação e homologação de veículos as agências normatizadoras desenvolveram diferentes ciclos de teste em dinamômetro, capazes de submeter motores e veículos a variadas condições de operação. Em dinamômetros de bancada os ciclos de teste tendem a submeter o motor às combinações de torque e rotação mais críticas, transitando entre condições de fadiga intermitente em um trajeto urbano intenso, até uma intensa demanda de uma rodovia de alta velocidade. Já em dinamômetros de chassi os testes são realizados submetendo-se o veículo a um perfil de velocidades e declives variando no tempo, chamados ciclos de condução. Os ciclos de condução podem buscar simular desde percursos de condução urbano (considerando as variações típicas de velocidade às quais os veículos seriam submetidos e as frequentes paradas devidas ao tráfego intenso e semáforos), até trechos de autoestradas (onde o veículo alcançaria velocidades mais elevadas, mantidas por longos períodos de tempo). Outro fator considerado neste tipo de teste é a inércia térmica do motor e sistema de

redução de emissões, de modo que os ciclos etapas de partida a frio e a quente. Como é o caso deste trabalho, para além da homologação de veículos potencialmente comerciais, os ciclos de condução podem ser utilizados também em simulações de desempenho do veículo nas etapas iniciais do projeto. A Tabela 5 reúne alguns dos principais ciclos de teste adotados na adequação de HDV às atuais normas de emissões de poluentes.

Tabela 5 – Principais ciclos de teste de validação de emissões para HDV em vigor.

Ciclo	Dinamômetro	Norma de Referência	Países que Adotam
FTP	Chassi	EPA	EUA
SET	Bancada	EPA	EUA
LLC	Ambos	CARB	EUA
WHSC	Bancada	Euro VI	UE, Brasil, China ^a
WHTC	Bancada	Euro VI	UE, Brasil, China ^a

Fonte: Adaptado de DieselNet (2025a)

a: A china utiliza ciclos próprios, adaptados dos padrões WHTC e WHSC.

É importante que se ressalte a ausência de testes de chassi nos ciclos exigidos pelo *Euro VI*. Os ciclos WHSC e WHTC tem foco principal o motor a combustão e os sistemas de tratamento de gases de exaustão, o que pode facilitar a obtenção de certificações de conformidade pelos fabricantes regidos pela norma europeia. Por outro lado, devido à suas especificidades para motores a combustão interna, estes ciclos não podem ser aplicados a veículos com motorização elétrica. Fez necessária, portanto, a criação de um ciclo de condução capaz de submeter veículos a condições análogas aos ciclos de teste de bancada, para que se pudesse comparar de forma adequada o desempenho de todos os tipos de veículos. Assim, foi desenvolvido o ciclo WHVC.

O *World Harmonized Vehicle Cycle* (WHVC) surge, portanto, como um ciclo de condução para teste de HDV em dinamômetro de chassi equivalente ao ciclo WHTC, visando a adequação de veículos elétricos e híbridos às normas de emissões *Euro VI* ou superiores. O WHVC também é de grande utilidade em projeto de trens de potência (como neste trabalho) e pesquisas que buscam simular e avaliar veículos, ou mesmo no desenvolvimento de ciclos de condução específicos para outras realidades. Assim como em Gavimath & Ravuri (2025) — que parametrizou os dados de condução real de diferentes caminhão em trechos indianos com o WHVC —, pesquisas relacionadas ao desempenho de HDV e projetos de trens de potência podem utilizar este ciclo como referência.

O WHVC é composto por uma sequência de três diferentes situações de condução: inicialmente um trecho urbano com duração de 900 segundos, seguido por um trecho rural de

481 segundos, e finalizado por um trecho de autoestrada de 419 segundos. O ciclo completo totaliza 1.800 segundos, submetendo o veículo a diversas condições de intermitência e elevação de demanda, com velocidades acima de 80km/h associados a uma acentuada declividade (DieselNet, 2025b). Para uma comparação adequada com o WHTC, o WHVC apresenta tanto um perfil de velocidades como de declividades variando no tempo. A declividade deve ser calculada em função da potência efetiva do veículo, conforme explicado em UNECE (2021).

Durante ciclos de teste ou de condução os motores e veículos devem seguir rigorosamente as rotações, velocidade, torque ou declives estabelecidos pelo ciclo. Como critério de validação de um teste UNECE (2021) estabelecem métricas aceitáveis de divergências entre a velocidade do veículo (v) e a velocidade indicada pelo ciclo (u), chamadas desvios de condução. Como primeiro passo deve ser estabelecida uma curva de regressão da diferença entre as velocidades, calculando-se o coeficiente angular a_1 pela Equação 2.3 e o coeficiente linear a_0 pela Equação 2.4. A partir da regressão são calculados desvio padrão SEE (standard error of estimate) e o coeficiente de determinação R^2 , através, respectivamente, da Equação 2.5 e Equação 2.6.

$$a_1 = \frac{\sum_{i=1}^n [(v_i - \bar{v}) \cdot (u_i - \bar{u})]}{\sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2}, \quad (2.3)$$

$$a_0 = \bar{v} - a_1 \cdot \bar{u}, \quad (2.4)$$

$$SEE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - a_0 - a_1 \cdot u_i)^2}{n - 2}}, \quad (2.5)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - a_0 - a_1 \cdot u_i)^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}, \quad (2.6)$$

2.5 Resistência ao movimento

Em simulações de dinâmica veicular, o fator de maior relevância na determinação dos esforços demandados ao trem de potência são as forças de resistência ao movimento resultantes de declives, resistências a rolagem — predominantemente advindo de atritos em componentes internos ao veículo e deformação das rodas — e resistência do ar. O esforço de declive é

dependente exclusivamente da massa total do veículo e do ângulo de inclinação ao qual o veículo está submetido. O veículo será capaz de galgar um declive desde que a área total de contato das rodas tratoras exerça atrito superior às forças externas atuando sobre ele (gravitacional e resistência do ar).

Para que se determine as forças resultantes da resistência à rolagem e arreamento aerodinâmico o veículo deve ser submetido a testes normatizados. Os atritos resultantes de rolamentos e sistemas de transmissão de um veículo podem ser determinados em ensaios de bancada. Ensaios em túnel de vento ou de dinâmica de fluidos computacional (CFD) podem determinar a força de resistência aerodinâmica independentemente das demais.

Para além dos ensaios individuais, buscando determinar a força de resistência total e o seu comportamento, dois tipos de ensaios podem ser realizados com o veículo na estrada: o *coastdown* e o teste em velocidades constantes. O *coastdown* consiste em registrar velocidades do veículo e do ar durante um processo de desaceleração natural do veículo (desacoplado do motor) entre duas velocidades pré-estabelecidas. Já no teste em velocidade constante são registrados torque do veículo e velocidade do ar durante a condução do veículo em duas ou mais velocidades fixas (Delgado *et al.*, 2019).

A resistência global ao deslocamento de um veículo em um plano horizontal é convencionalmente representada em função de três constantes:

$$F_r = a + b \cdot v + c \cdot v^2, \quad (2.7)$$

onde v é a velocidade do veículo e a , b e c são constantes relacionadas com a massa do veículo. As três constantes assimilam componentes tanto da resistência a rolagem como aerodinâmica, sendo facilmente determinadas através dos testes previamente citados.

Ates & Matthews (2012) avaliam a confiabilidade do método proposto pela Equação 2.7, desenvolvendo um modelo global de definição da força de resistência para HDV. Os autores pondera, no entanto, que não existe consenso sobre qual modelo representa melhor o desempenho de um veículo pesado. Já EPA (2005) reitera a relevância do modelo descrito na Equação 2.7, propondo coeficientes para caminhões acima de 14.968t conforme elencado por Petrushov (1997):

$$\begin{cases} a = 0,0661 \cdot M \\ b = 0 \\ c = 2,89 + 4,21 \cdot 10^{-5} \cdot M \end{cases} \quad (2.8)$$

3 SOLUÇÕES EM DESCARBONIZAÇÃO: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A crise climática torna urgente a adoção de medidas de mitigação dos impactos climáticos. A adoção de projetos nacionais de descarbonização faz-se necessária. Porém, para que se obtenham resultados à altura dos desafios, e em um curto espaço de tempo, deve-se avaliar tanto a conjuntura internacional, como as condições impostas pelo contexto nacional.

O capítulo atual perpassa relatórios e estudos envolvendo soluções de descarbonização para HDV em diferentes realidades. Em seguida condensa-se esta análise, apontando-se as alternativas com real potencial para a realidade brasileira.

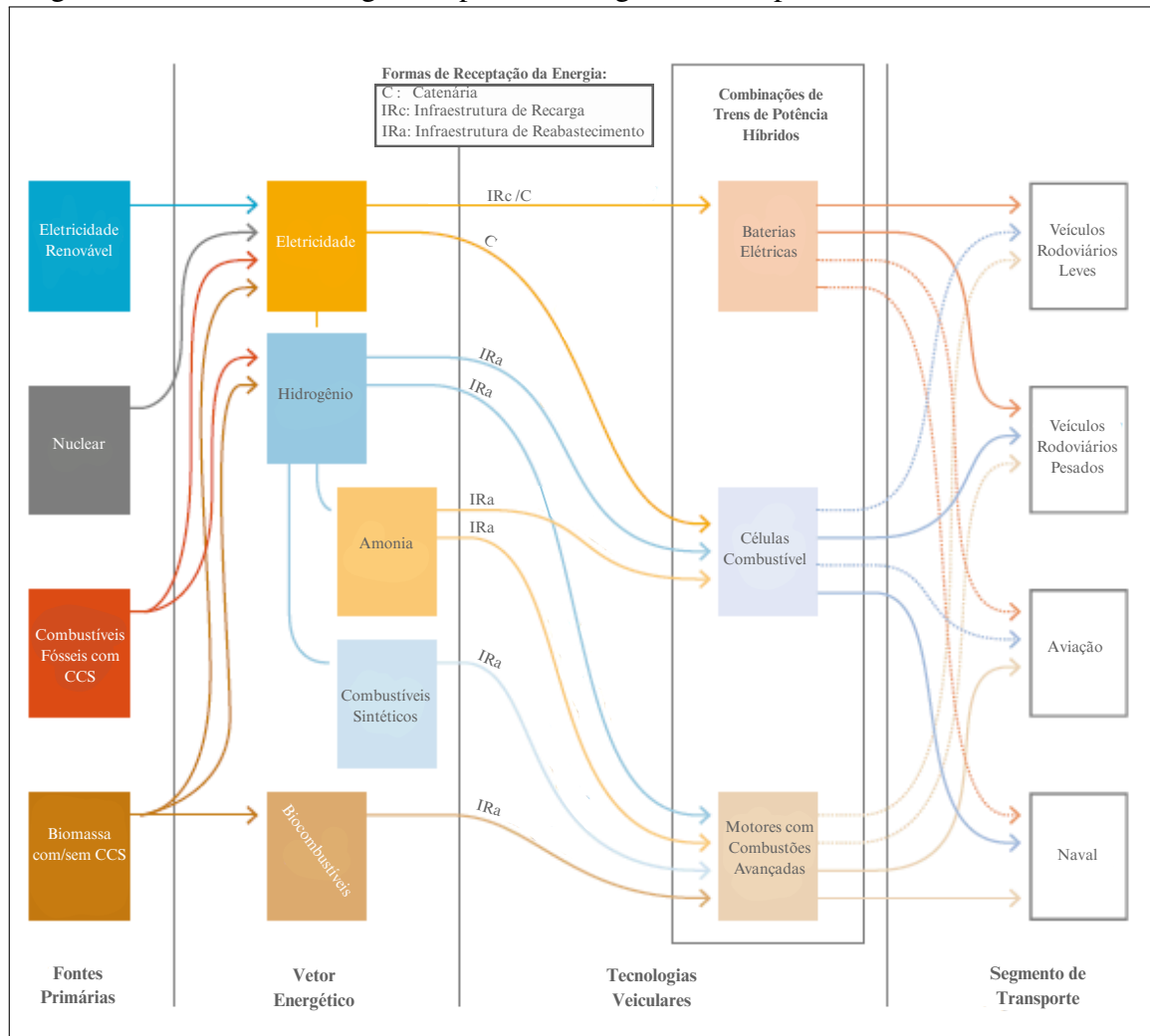
3.1 Soluções na descarbonização de HDV

Norris *et al.* (2017) explanam as perspectivas de avanço tecnológico para os HDV no ano de 2017, apontando que à vista das tecnologias de 2015 as HDV não eram adequados a hibridização, assumindo, porém que esta mesma alegação não poderia ser feita para o ano de 2030. O relatório também aponta que as diferenças nos investimentos em pesquisas sobre HDV menos poluentes nos EUA e UE dependem de características intrínsecas de cada região, como velocidades médias de tráfego, e podem levar a respostas tecnológicas divergentes. Porém, como se verá ao longo deste capítulo, diversas soluções vem sendo apresentadas, com diferentes níveis de potencialidade, de modo que já na década de 2020 a viabilidade de HDV híbridos é apontada como a saída ideal para algumas realidades Barbosa (2020).

Na Figura 3, adaptada do relatório de Jaramillo *et al.* (2022), são esquematizados os principais caminhos alternativos, em termos de fonte energética, para redução do impacto climático do setor de transportes. No diagrama destacam-se os combustíveis fósseis e algumas biomassa, que são apresentados como solução sustentável desde que haja captura dos gases estufa emitidos na sua combustão (*carbon capture and storage* - CCS), o que os inviabiliza, em grande parte, como vetor energético para abastecimento veicular.

Na análise da viabilidade da substituição do óleo *diesel* por outros vetores menos poluentes, Cai *et al.* (2017) observaram que embora a combustão de gás natural nos HDV tenha um grande potencial de redução de emissões de NO_x e de ser economicamente competitivo, não se observa grande impacto na redução de emissões de CO₂. Agarwal *et al.* (2025) analisam as atuais potencialidades dos biocombustíveis e outros vetores energéticos, destacando a importância da utilização dos MCI como principal fonte de energia em veículos híbridos, devido à autonomia

Figura 3 – Caminhos energéticos para tecnologias de transporte de baixo carbono.



Fonte: Adaptado de Jaramillo *et al.* (2022, Figura 10.2).

advinda da sua grande densidade energética. O artigo também explana a versatilidade da amônia como vetor intermediário e aditivo combustível em motores *diesel*, e ressalta a viabilidade e importância do H_2 como combustível, apesar da imaturidade das tecnologias de combustão e de infraestrutura.

Ampah *et al.* (2024) revisam pesquisas relacionadas à combustão de H_2 em MCI e o potencial de crescimento de pesquisas nesta área. O autor destaca uma tendência de substancial redução nas emissões de CO_2 em detrimento do aumento de emissões de NO_x quando H_2 é adicionado às combustões convencionais. No artigo também é reforçada a imaturidade das tecnologias relacionadas à infraestrutura de transporte e distribuição do hidrogênio, a despeito das metas estabelecidas por diversos países e pesquisas avançadas na produção do gás.

Já voltando-se para os veículos híbridos, a bibliografia avalia a aceitação do setor privado, a viabilidade econômica e o potencial de redução de emissões da combinação de diversos

vetores energéticos. A infraestrutura existente ou os investimentos estatais neste campo são fator de grande relevância.

No contexto alemão, Breuer *et al.* (2021) avaliam, para um trecho de longa distância e outro urbano, a viabilidade econômica e ambiental de HDV e LDV híbridos, combinando tecnologias de motores *diesel*, células combustível, bancos de baterias e catenárias aéreas. A pesquisa conclui que para os trajetos de longas distâncias o uso de HDV *diesel* hibridizados com catenárias apresenta o melhor desempenho econômico com emissões estufa 50% menores, porém a sua implantação em larga escala eleva o investimento em infraestrutura. Bancos de baterias combinadas com catenárias apresentam os melhores resultados para todos os tipos de trajetos, porém os elevados custo das baterias e a inviabilidade econômica da instalação de catenárias aéreas em zonas de baixo fluxo viário depõem contra esta alternativa. Por fim, LDV elétricos combinados com células combustível se apresentam como melhor solução para os trechos urbanos, muito embora o custo de produção de H₂ seja ainda um grande obstáculo para esta solução.

Grinsven *et al.* (2021) ressaltam que o projeto de transição climática europeu conta hoje com uma mínima e incipiente infraestrutura de recarga para veículos elétricos e movidos a H₂ para uso público. Além disso, diante do prolongado tempo de recarga dos veículos com essas tecnologias, o relatório aponta que, para veículos que percorrem longas distâncias, como é o caso da maioria dos HDV, a infraestrutura de reabastecimento noturno é essencial.

Kinnon *et al.* (2020) discutem as alternativas tecnológicas para a transição energética dos HDV no estado da Califórnia (EUA), concluindo que, diante das incertezas com relação à disponibilidade de biomassa para a viabilização de biocombustíveis, a melhor alternativa para o estado é a utilização de células combustível abastecidas com H₂ proveniente de eletrólise, o que demanda uma infraestrutura de geração de energia elétrica mais robusta e mais limpa.

Li & Yang (2020) estuda o ciclo de vida completo de caminhões leves elétricos na realidade chinesa e argumenta inviabilidade deste modal em ambiente onde a temperatura ambiente é inferior a 0°C devido à ineficiência do sistema de baterias em baixas temperaturas. Por outro lado, mediante avanços vindouros na vida útil das baterias, este tipo de veículo estaria apto para substituir os caminhões leves *diesel* como modais menos poluentes.

ITF (2023) ressalta a importância da atuação política como estratégia crucial para uma rápida descarbonização, dada a grande dependência das tecnologias atualmente aplicáveis de uma robusta infraestrutura. Bae *et al.* (2022) estudam a aceitabilidade de operadores de frotas

veiculares a vetores energéticos alternativos (gás natural, propano, eletricidade, H₂, etanol e biodiesel), alcançando 38 fatores que a influenciam positiva ou negativamente.

Hensher & Wei (2024) utiliza uma ferramenta auxílio de decisão para analisar 19 diferentes cenários de descarbonização para a Austrália, combinando três diferentes escalas de operadores de frota veicular, com a combinação de diferentes metas de descarbonização (Euro VI, caminhões totalmente elétricos e com células combustíveis), e considerando-se emissões diretas e indiretas, custos de implantação de cada tecnologia e previsões de preços de mercado dos combustíveis. O trabalho conclui não haver solução que atenda ao mesmo tempo às demandas econômicas, de emissões de gases estufa e de poluição urbana, uma vez que o custo a ser investido pode ser impeditivo para grande parte dos operadores, que possuem margens de lucro estreitas. Diante de uma margem de tempo muito pequena (até 2040) as decisões legislativas se restringem à escolha de um único caminho, seja de mitigação em direção a caminhões de baixa emissão, ou investimento em infraestrutura e subsídio para um cenário de emissão zero.

Jaramillo *et al.* (2022) avaliam os riscos e potencialidades de redução de emissões de CO₂ de todos os setores do transporte mundial, apontando a pouca atenção que os transportes de carga de longa distância estão recebendo. O relatório aponta que embora diversas pesquisas sejam empreendidas visando elevar a eficiência dos motores *diesel*, estes ainda estariam aquém das metas de mitigação para 2030. Desta forma, o gás natural, embora emita gases estufa, é apontado como um vetor de mitigação a curto prazo, em substituição ao *diesel*. É apontado também que maiores investimentos em transporte ferroviário tendem a menores emissões globais, principalmente se os trens fizerem uso de biocombustíveis, eletricidade, hidrogênio ou amônio como vetor energético. Os veículos elétricos alimentados por catenárias são apontados como, já na atualidade, potencialmente competitivos com os *diesel*, e embora exijam um elevado aporte financeiro inicial (devido às baterias), tendem a ficar mais atrativos com futuras elevações no preço dos combustíveis fósseis. Por fim o relatório aponta que o H₂ tende a uma redução gradual de custo no mercado mundial, e, embora não seja ainda viável para uso em HDV, apresenta-se como um vetor energético em crescimento.

3.2 Análise do melhor vetor energético

Diante do apresentado pela literatura, as principais abordagens científicas propostas para lidar com os problemas ambientais e climáticos relacionados aos HDV são: melhoria da eficiência dos motores a combustão interna *diesel*, queima combinada do óleo *diesel* junto com

outros diversos vetores energéticos, substituição do óleo *diesel* por biocombustíveis, substituição da frota atual por veículos elétricos, ou por veículos movidos a H₂ utilizando células combustível. Além disso, estratégias de combinação destas tecnologias também foram analisadas, considerando cenários diversos.

A partir dos dados apresentados por IEA (2023) afere-se que a energia utilizada pelo setor de transportes mundial em 2000 era 95% composta por combustíveis fósseis, passando para 93% em 2010, 92% em 2019 (ano com maior registro) e 91% em 2022. O gás natural e a energia elétrica se mantiveram neste período compondo cerca de 4% e 1%, respectivamente. Já os biocombustíveis representaram 1%, 2%, 3% e 4% respectivamente em 2000, 2010, 2019 e 2022. Avalia-se, portanto, uma tímida tendência de substituição dos combustíveis fósseis pelos biocombustíveis. Tal avanço, embora ainda bastante aquém do necessário para uma redução substancial das emissões, se potencializado pode representar um caminho importante na mitigação dos impactos climáticos (Jaramillo *et al.*, 2022).

A melhoria de eficiência dos motores *diesel*, apesar de ter surtido efeito na transição dos critérios de emissão dos anos 1990 aos 2020, parece ter encontrado um teto e não tem mais potencial de mitigação dos impactos climáticos (Jaramillo *et al.*, 2022). Já a substituição do *diesel* por gás natural só se mostra ambientalmente vantajosa a curto prazo (Jaramillo *et al.*, 2022; Breuer *et al.*, 2021).

O H₂, em especial o obtido de fontes renováveis, ganhou notoriedade, inclusive fora do contexto científico. No entanto, apesar do potencial do H₂ como vetor energético predominante a longo prazo, é importante que se ressalte que ele é frequentemente mencionado como um vetor energético de cujas tecnologias de uso, armazenamento e distribuição são imaturas, contando com infraestrutura de produção e distribuição extremamente incipientes (Ampah *et al.*, 2024; Agarwal *et al.*, 2025; Grinsven *et al.*, 2021; Kinnon *et al.*, 2020; Breuer *et al.*, 2021; Jaramillo *et al.*, 2022).

Já a adoção de veículos totalmente elétricos envolve a ponderação de alguns fatores:

1. A fonte primária da energia elétrica deve ser proporcionalmente menos poluente que o próprio veículo para que a substituição do *diesel* se justifique.
2. Deve existir uma infraestrutura capaz de atender à nova demanda de energia elétrica.
3. Deve existir uma infraestrutura capaz de distribuir adequadamente esta energia.
4. A energia armazenada por baterias veiculares é consideravelmente inferior à dos

combustíveis utilizados em motores a combustão interna.

Com relação ao ponto 1 deve-se levar em consideração a matriz energética da região na qual o vetor será utilizado. As três maiores regiões consumidoras de energia do planeta, China, EUA e UE, tem como maiores fontes primárias de energia, respectivamente, carvão mineral (61%), gás natural (42%) e nuclear (23%)(IEA, 2025a). Dentre estes a UE é a única com potencial evidente de implantação de veículos elétricos com real redução de impacto ambiente. Há de se considerar também que os impactos na qualidade do ar, potencial de captura de carbono em usinas, além do ciclo de vida das baterias, dentre outras tecnologias, para que se possa afirmar o real impacto positivo desta tecnologia. Há de se considerar ainda que, embora possam reduzir emissões de agentes causadores da poluição urbana do efeito estufa, todas as fontes de energia consideradas limpas tem potencial para causar impactos ambientais e sociais diversos (Castro-Diaz *et al.*, 2023; McKenna *et al.*, 2025; Fortunato Sobrinho Júnior *et al.*, 2022; Maddison *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2024; El-Hinnawi, 1977; Yüksel *et al.*, 2024).

No tocante ao ponto 2, é importante que se avalie a matriz energética regional como um todo. A substituição dos motores a combustão por elétricos significa migrar a quase totalidade da matriz energética regional para a geração de energia. Para o caso dos EUA, que tem 36% de sua matriz energética dependente do petróleo (IEA, 2025c) — que por sua vez é utilizado quase que na totalidade no setor de transportes — a total migração para veículos elétricos significaria no mínimo um aumento de igual valor na produção de energia elétrica, preferencialmente por fontes renováveis. A UE por sua vez tem 34% de sua matriz energética advinda do petróleo, porém, para além da demanda proveniente da já crescente frota de veículos elétricos, esta precisa lidar também demandas ligadas à migração do aquecimento doméstico para o modal elétrico e o crescimento do consumo energético dos *data centers*.

A demanda elétrica de *data centers* se tornou relevante no debate energético mundial diante da difusão da tecnologia de criptomoedas e popularização do uso das inteligências artificiais generativas (GenAI), devido ao elevado nível de processamento necessário para operar estas tecnologias. Estima-se que uma busca comum na plataforma *Google* gaste em média 0,3Wh de energia, ao passo que, em 2023, uma pergunta respondida pela plataforma *ChatGPT* gastaria cerca de 2,9Wh (Vries, 2023). A previsão de IEA (2024b) é que o consumo mundial de energia pelos *data centers* tende a dobrar entre 2022 e 2026. Além disso, para o mesmo período, o relatório prevê que o crescimento de demanda de energia elétrica da União Europeia devido aos *data centers* (29TWh) representa 78% do valor da demanda prevista para veículos elétricos

(37TWh).

Já o ponto 3 diz respeito à infraestrutura necessária para atender à demanda dos veículos elétricos, seja em termos de malha de distribuição elétrica, seja de tecnologias de recargas individual dos veículos. A China vem testando tecnologias de veículos elétricos há mais de uma década, e já foram reportados impactos dos veículos elétricos nas suas redes de distribuição elétrica (Mojlish *et al.*, 2025). Slednev *et al.* (2022) avaliaram o impacto das tecnologias de recarga rápida de veículos na infraestrutura de alta e extra alta tensão da UE, constatando uma robustez adequada às demandas previstas de veículos elétricos. Já os EUA traçam planos de atualização da sua malha (OE, 2024) em vista da crescente demanda deste tipo de veículo.

Para além de uma rede de distribuição robusta, diversas tecnologias para a recarga dos veículos elétricos são propostas. A solução convencional de estações de recarga elétrica foram sendo atualizadas, de pontos com 43kW de potência máxima, para estações de recarga ultra-rápida capazes de prover até 3,75MW. Os HDV, cujas capacidades das baterias podem ser maiores (garantindo autonomia), contam com estações de recarga noturna, de modo que a recarga seja realizada no período de descanso do motorista, com potência de até 1MW (Bernard *et al.*, 2022).

Uma alternativa à recarga de baterias reside na tecnologia de troca do banco baterias em estações próprias. Esta tecnologia é predominante na realidade chinesa e mais recentemente está evoluindo para um contexto de "baterias como serviço". Apesar de haver problemas com relação à padronização dos modelos de baterias, questões como envelhecimento, descarte e reciclagem deste componentes centralizados, facilitando a sua execução mais eficiente (Bernard *et al.*, 2022). Hao *et al.* (2025) avaliaram diferentes perfis de estações de troca, a depender da quantidade de estações disponíveis para os caminhões ao longo da rodovia.

Em paralelo a isso diversos projetos piloto de redes de catenária aérea rodoviária — que, semelhantes às utilizadas em redes ferroviárias, possibilitam a recarga do veículo em movimento com a utilização de um pantógrafo para coletar energia de uma linha elétrica suspensa — foram instaladas estão em andamento na UE, EUA e Reino Unido (Bernard *et al.*, 2022), com potenciais impactos positivos em termos de meio ambiente (Plötz *et al.*, 2019). Já a tecnologia de recarga *in-road wireless* ainda se encontra nos estágios iniciais de desenvolvimento. Ela nasce como uma versão mais sofisticada das catenárias aéreas, consistindo de um banco de bobinas abaixo da rodovia que excitará campos magnéticos em bobinas presentes no caminhão. Esta

tecnologia surge como uma proposta ousada, necessitando superar questões relacionadas aos seu custo, peso e espaço ocupados nos caminhões, padronização e efeitos adversos em pessoas e animais (Bernard *et al.*, 2022). Tanto a recarga de baterias através de catenárias aéreas como por *in-road wireless* são soluções que viabilizam bancos de baterias menores, reduzindo a tara do veículo e o seu custo. No entanto surgem debates políticos na UE sobre a transferência do ônus do proprietário do veículo para o erário (Bernard *et al.*, 2022).

As tecnologias de recarga em trânsito também dizem respeito ao ponto 4, no tocante à autonomia dos veículos movido a bateria elétrica. As baterias elétricas veiculares mais avançadas em estudo tem um potencial de densidade energética teórica superior a $3,6\text{MJ/kg}$ (Cao *et al.*, 2020), ao passo que o poder calorífico do *diesel* é em torno de $42,3\text{MJ/kg}$ (EPE, 2025). Utilizando-se os dados de consumo energético disponibilizados por Hensher & Wei (2024), tem-se que um caminhão com uma composição de 7 eixos (de cavalo mecânico de 3 eixos acoplado a um semi-reboque de 4 eixos) transportando um total de 1.000 toneladas de carga (fazendo uso de diversas viagens) apresentaria um consumo específico de *diesel* (no padrão de motores Euro VI) e energia elétrica de, respectivamente, 26kg/km e 380MJ/km . Desta forma, se considerada a densidade energética teórica da bateria citada anteriormente, o peso específico de baterias seria cerca de 106kg/km . Assim, para um cenário de caminhões elétricos em estado da arte, seriam necessárias 4 vezes mais ciclos de abastecimento de baterias ou uma carga 4 vezes maior de baterias para uma mesma viagem. Há de se ponderar que muito embora o custo da energia elétrica seja muito inferior ao do *diesel*, caso a recarga não fosse realizada durante a noite, uma recarga em uma estação convencional levaria tempo muito maior de recarga quando comparada ao diesel (Grinsven *et al.*, 2021), impactando no tempo útil de entregas do veículo e na lucratividade do seu serviço.

3.3 Melhor estratégia para o Brasil

A frota de caminhões brasileira é majoritariamente composta por veículos puramente *diesel*, com uma idade média de 21 anos, o que, conforme reforçado por Abipeças & Sindipeças (2025), é preocupante pois trata-se de veículos predominantemente incompatível com as normas de restrições de emissão dos últimos 20 anos. Por outro lado o programa nacional Mobilidade Verde e Inovação (Mover), lançado no final de 2023, prevê um total de R\$ 19 bilhões em créditos concedidos a empresas que invistam em descarbonização (Brasil., 2023). Já em 2024 apesar de um tímido montante atual, observa-se um crescimento acentuado na aquisição de veículos

elétricos como um todo, com um total de 480 caminhões elétricos emplacados (FENABRAVE, 2024).

Apesar da projeção de crescimento da frota de veículos elétricos no Brasil, a autonomia se mostra como um grande obstáculo para nesta estratégia de descarbonização, em especial para os HDV, que percorrem longas distâncias. As soluções de autonomia implantadas por outros países — estações de recarga super rápida, redes de catenária aérea, BSS (Jaramillo *et al.*, 2022) — requerem, de modo geral, grandes investimentos governamentais em infraestrutura, ou mesmo em incentivos em iniciativas do setor privado. O Brasil, por outro lado, não apresenta plano breves de investimentos neste tipo de infraestruturas. Com a recente crescimento de fontes de energética renováveis em sua matriz energética — eólica e solar fotovoltaica — o país vem focando seus esforços na expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN) de distribuição de energia elétrica e ampliando a sua capacidade de armazenar energia, de modo a lidar com as flutuações causadas pela intermitência das novas fontes (Baitelo; Silva, 2024; Lucchesi *et al.*, 2025). Vislumbra-se um dos possíveis desfechos da implantação de HDV puramente elétricos no caso paulistano em evidência em 2025: o projeto de implantação ônibus elétricos, em curso na cidade de São Paulo, vem se mostrando gravemente inviabilizado em decorrência da insuficiente infraestrutura para atender ao modal (Barros, 2025).

A solução para autonomia de HDV no Brasil pode residir na sua tradição na produção e utilização de biocombustíveis. A cana-de-açúcar, amplamente cultivada no país para a produção de açúcar desde seu período como colônia, despontou, no século XX como fonte para produção de etanol. O Brasil possui um extenso histórico de utilização do etanol como combustível em veículos automotores, com as primeiras pesquisas datando de 1923, passando pelo Programa Nacional do Álcool (Proálcool) durante a crise do petróleo na década de 1970, até uma atual frota de 80% de carros *flex-fuel* (capazes de operar com misturas de quaisquer quantidades de etanol e gasolina)(Brasil., 2023). Além disso o já em 1946 era desenvolvidas técnicas de produção de etanol também a partir de bagaço de mandioca (Santos, 2018). Tal histórico levou o Brasil a ser o país com maior percentual de biocombustíveis presentes no combustível consumido pelo setor de transportes.

O uso do etanol hidratado (E100) ainda apresenta desafios, uma vez que a sua combustão tem potencial para emissão de poluentes geradores de gás ozônio (O₃) superior à combustão da gasolina pura ou misturada com 22% de etanol (E22) (Siciliano *et al.*, 2021; Siciliano *et al.*, 2022). Porém, conforme IEA (2024a) o etanol é — dentro de uma reduzida faixa

de incerteza — um dos biocombustíveis com o menor potencial para emissão de gases estufa, com cerca de 30% do valor para combustíveis fósseis. Nogueira *et al.* (2008), considerando o potencial de captura de carbono do cultivo da cana-de-açúcar, já previam um potencial de emissões negativas de CO₂ no ciclo completo do etanol. Jaramillo *et al.* (2022) consideram o impacto de mudanças do uso do solo para produção de biocombustíveis como fator decisivo na sua viabilidade como substituto dos combustíveis fósseis, e ponderam que a compatibilidade do biocombustível com as tecnologias já existentes de motores a combustão interna e postos de combustíveis é de grande importância na viabilização do vetor energético.

Avaliando o processo de produção do açúcar e do etanol a partir da cana-de-açúcar Dias *et al.* (2015) identificaram os impactos ambientais da co-produção. Assim, os autores propõem um processo de industrialização do chamado bioetanol — etanol com emissões nulas de CO₂ — a partir dos subprodutos do açúcar: bagaço e melaço. A proposta é de que o impacto ambiental envolvido na plena produção do açúcar seja reduzido, aproveitando-se todos os subprodutos e rejeitos em processos envolvendo algas e reforma, extraindo-se o bioetanol, biodiesel — a partir de um subproduto gorduroso — e proteínas.

Diante disto, consideradas as limitações na autonomia dos veículos totalmente elétricos e o protagonismo brasileiro na produção e utilização do etanol, faz-se necessária a avaliação do potencial de veículos híbridos que combinam ambos os vetores. Os veículos automotores híbridos possuem diversas possíveis configurações, a medida em que se distancia, conceitualmente, dos veículos a combustão interna convencionais e se aproximam dos veículos totalmente elétricos. Além disso, em um veículo híbrido pode-se dimensionar de forma mais adequada a participação de cada componente, buscando um desempenho ótimo em todos os aspectos. Em Moura Júnior (2019) a hibridização veicular possibilitou a operação do MCI em regime de ignição por compressão de carga homogênea (HCCI) resultando em uma redução tanto no consumo de combustível como todas as emissões de poluentes.

De fato, já se apresenta como a solução de mercado para os LDV uma categoria de veículo híbrido com trem de potência totalmente elétrico, capaz de gerenciar de forma ótima todos os seus componentes, associado à autonomia energética de um motor a combustão (BMW, 2025). Os veículos totalmente elétricos que possuem sua autonomia estendida por um motor a combustão interna operando como gerador de energia elétrica embarcada são denominados REEV.

A presença de MCI nos REEV permite um dimensionamento mais inteligente dos

bancos de baterias, a depender da demanda estabelecida para o veículo. O motor a combustão auxiliado por um gerador fornece energia capaz tanto de impulsionar o veículo como recarregar a bateria. Além disso, é importante que se considere a flexibilidade de demanda que a bateria é capaz de fornecer sem maiores problemas, o que pode viabilizar uma operação em regime permanente ideal do motor a combustão, na qual se pode buscar um equilíbrio entre redução de poluentes e baixo consumo de combustível. Avaliando o desempenho de um LDV com motor *diesel* Sousa (2019) obteve um ganho de autonomia de 22% quando o veículo é convertido em REEV, e de 15% quando o REEV opera em regime HCCI, queimando etanol. A combustão HCCI apresenta uma redução drástica de emissões de NO_x , elevando, porém a geração de HC e CO.

Dias *et al.* (2024) avaliam, através testes de REEV em dinamômetro de chassi, que a utilização de E100 tem o potencial elevar significativamente a autonomia do veículo, ao mesmo tempo que reduz as emissões de CO_2 . Já Weissinger *et al.* (2025), utilizando um modelo validado de um REEV operando com combustão de E27 e E100, demonstraram que na otimização dos parâmetros do motor a combustão para o etanol é possível se reduzir em até 23,5% a emissão de CO_2 e em até 20% o consumo de combustível. Ambos os artigos mencionam o potencial aumento nas emissões de NO_x da combustão do etanol em comparação com a gasolina, sugerindo estudos mais aprofundados sobre este assunto.

4 METODOLOGIA

Uma vez definido o tipo de caminhão ser estudado, propõe-se a avaliação do desempenho de diferentes configurações de veículo. Para tanto se fará uso de em uma plataforma de simulação de dinâmica veicular. Busca-se analisar a capacidade de transporte do veículo com mínimo consumo energético, em contraste com suas emissões de poluentes. Diferentes veículos serão simulados com diferentes quantidades de baterias, contrapesando-se disponibilidade de energia e capacidade de transporte de carga.

Neste capítulo serão, inicialmente, definidos os veículos que serão modelados para simulações. Em seguida o modelo será exposto, descrevendo-se as estratégias e controle de energia e pontuando parâmetros e dados utilizados.

4.1 Definição dos veículos modelados

Diante do explanado na revisão bibliográfica do Capítulo 3 aponta-se o caminhão REEV abastecido a álcool como proposta de descarbonização mais adequada à realidade brasileira. Porém, conforme descrito na seção 2.1, existem diversas configurações de caminhões, com aplicações e capacidades de carga diferentes. Visando uma perspectiva mais ampla sobre o desempenho de caminhões REEV, optou-se por simular dois caminhões de escalas diferentes: um caminhão fixo e um articulado. Considerando-se os tipos listados na Tabela 1 e os limites de PBT referenciados na sequência, um caminhão fixo comum é limitado a 23t. Por outro lado, uma composição articulada pode, sem necessidade de permissão especial, pesar um total de até 57t.

Através dos relatórios em FENABRAVE (2025) observa-se que, na categoria caminhões pesados, o modelo VOLVO/FH 540 (540cv de potência) permanece como o mais emplacado — e portanto mais vendido — no Brasil desde 2019. Se avaliados os veículos com faixa de potência inferior a 540cv, o VOLVO/FH 460 (460cv) é o mais emplacado de 2023 até o momento. Além disso, ambos estão entre os cinco mais emplacados no país desde 2012 (ano de lançamento do modelo de 540cv). Tal notoriedade evidencia a sua representatividade para a realidade brasileira. Deste modo optou-se por modelar o caminhão fixo deste trabalho conforme o modelo VOLVO/FH 460 (equivalente a 340kW), enquanto o cavalo mecânico do caminhão articulado baseia-se no modelo VOLVO/FH 540 (400kW). Além disso, foi designado o tipo 6x2 — mais leve — para a versão fixa e 6x4 — com mais atrito na tração — para a versão articulada.

No que se refere ao MCI utilizado para prolongar a autonomia do caminhão (*range*

extender), foi escolhido um motor 1.0 turbo para veículos compactos, atualmente em estudo no LHMT, e cuja divulgação de detalhes é restrita por questões de segredo industrial. Dentre os motores estudados pelo laboratório, este possui todos os mapas necessários para a simulação com etanol, e, por operar com turbocompressor, apresenta potência relativamente elevada dentre os motores de ignição por centelha mais modernos. As características básicas do motor selecionado são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Características do motor a combustão interna designado para as simulações.

Potência máxima	92kW ^a	Nº de Cilindros	3
Torque máximo	200Nm	Válvulas por Cilindro	4
Cilindrada	999cm ³	Diâmetro do Cilindro	74,5mm
Taxa de Compressão	10,5 : 1	Curso dos Pistões	76,4mm

Fonte: LHMT.

a: Valor máximo disponível no mapa de potências.

Há de se pesar que, a despeito de ser relativamente potente, este motor não é capaz de prover as potências selecionadas para os caminhões. Desta forma, propõe-se que os caminhões possam contar com mais de um MCI, operando simultaneamente com 1, 2 ou 4 motores. Esta escala de potência consiste simplesmente na aplicação de um fator multiplicador de 2 e 4 ao torque e aos valores em todos os mapas (potência, consumo e emissões). É importante, também, que o gerador acoplado ao MCI — responsável por converter a sua potência mecânica em eletricidade — tenha potência compatível com o mesmo. Porém, a fim de se evitar problemas de simulação devido ao travamento do eixo do MCI diante de uma demanda total de geração, atribui-se ao gerador uma potência 1kW inferior à máxima do motor a combustão correspondente.

São, por fim, propostas 4 configurações de caminhões, conforme a Tabela 7. Serão avaliadas duas configurações de caminhão fixo, uma delas com um MCI e outra com dois motores, e duas de articulado, com dois e quatro motores.

Um vez definidas as quatro configurações, são calculadas as massas de cada um. A Tabela 8 expressa a estimativa de massa das configurações fixas. Cada componente considerado no cálculo é especificado na primeira coluna. A segunda coluna indica se a massa deste componente foi somado ou subtraído na equação. As terceira e quarta colunas indicam o valor de massa de cada componente para as configurações A1 e A2, respectivamente. A massa das baterias foi excluído nesta etapa, pois será considerado posteriormente durante cada simulação.

Dentre os catálogos do fabricante para caminhões 6x2 não se encontra uma versão com carroceria fixa. Deste modo a massa do Chassi FH-6x2R — de carroceria fixa com 5600m

Tabela 7 – Configurações de caminhão propostas para simulações de dinâmica veicular.

Id.	Caminhão			Maq. Elétrica Pot[kW]	MCI		Gerador ^a Pot[kW]
	Tração	Tipo	PBT[t]		Motores em paralelo	Pot[kW]	
A1	6x2	Fixo	23	340	1	92	91
A2	6x2	Fixo	23	340	2	184	183
B2	6x4	Articulado	57	400	2	184	183
B4	6x4	Articulado	57	400	4	368	367

Fonte: Própria.

a: A potência do gerador foi arbitrada sempre com 1W a menos que a do MCI, evitando-se, desta forma, travamento do eixo do motor a combustão quando fosse demandada geração máxima do elétrico.

entre o eixo dianteiro e o primeiro eixo traseiro — foi estimada. Inicialmente subtraiu-se a massa do chassi do modelo FH-6x2T (cavalo mecânico) da massa do FH-6x4T equivalente, de modo a obter-se uma estimativa da massa adicional correspondente ao tracionamento do segundo eixo. Em seguida este resultado foi subtraído da massa do chassi do modelo FH-6x4R versão 5600, resultando estimativa da massa do chassi de um modelo FH-6x2R versão 5600 adotado em tabela.

Tabela 8 – Cálculo da massa final, sem baterias, das configurações A1 e A2.

COMPONENTE	Equação	MASSA[kg]		FONTE
		A1	A2	
FH-6x2R Chassi Versão 5600	+	9868 ^a		Estimativa
Combustível + 2 Reservatórios(490L)	+	1005 ^b		(Volvo, 2022b)
Motor D13K460 (460cv)	-	1116		(Volvo, 2021)
SCR	-	130		(Volvo, 2021)
Caixa de Marchas AT2612 G	-	341,67		(Volvo, 2022a)
Baú fixo (9m)	+	1980 ^c		(Facchini, 2025a)
MCI 92kW ou 184kW	+	106	212	LHMT
Catalisador	+	7,5	15	LHMT
Máquina elétrica 340kW	+	136 ^c	136 ^c	(Nidec, 2025)
Gerador 91kW ou 183kW	+	56 ^c	86 ^c	(Nidec, 2025)
MASSA FINAL SEM BATERIAS	=	11.552	11.687	-
LIMITE CONTRAN 882			23.000	-

Fonte: Própria.

a: Massas estimada subtraindo-se a massa correspondente a um segundo eixo tracionado do modelo FH-6x2R(5600).

b: Somada a massa de dois reservatório à de 880 litros de etanol.

c: Estimativa através de regressão linear dos valores disponibilizado em tabela.

Sendo o volume dos reservatórios de combustível um item configurável catálogo do chassi, optou-se por usar em todos os modelos o maior volume de combustível disponível. Trata-se de dois reservatório de 490 litros, que, conforme catálogo, têm massa individual de 530kg quando cheios de óleo *diesel*. Consideradas as densidades do óleo *diesel* como 0,865kg/dm³

e do etanol hidratado como $0,789\text{kg}/\text{dm}^3$ (ANP(Brasil), 2021), calcula-se a massa total dos reservatórios cheios de E100.

No cálculo da massa do volume de contenção de carga, optou-se pelo formato baú (nomeado pelo fabricante de "furgão carga seca"). Esta escolha visa assemelhar-se à composição (caminhão e semi-reboque) referenciado em desenhos por Petrushov (1997), visando um comportamento mais próximo da referência em termos de arraste do ar. Através de regressão linear avaliou-se, com base no comprimento de baús no catálogo do fabricante Facchini — um dos mais relevantes no mercado nacional (OTM, 2023) — a massa para um baú de 9m (conforme cota designada para tal no catálogo do chassi versão 5600). Da mesma forma, a massa dos motores elétricos é obtida com base na potência de cada um, fazendo-se uso de regressão linear, conforme os motores do fabricante Nidec.

A Tabela 9 apresenta o mesmo equacionamento da tabela anterior para as configurações B2 e B4. Neste caso a massa de chassi é explícita em catálogo. A massa do semi-reboque — também do tipo baú, ou furgão — corresponde ao modelo de 15,4m do fabricante.

Tabela 9 – Cálculo da massa final, sem baterias, das configurações B2 e B4.

COMPONENTE	Equação	MASSA[kg]		FONTE
		B2	A2	
FH-6x2R Chassi Versão 3600	+	9.890		(Volvo, 2022c)
Combustível + 2 Reservatórios(490L)	+	1005 ^a		(Volvo, 2022c)
Motor D13K540 (540cv)	-	1.145		(Volvo, 2019)
SCR	-	130		(Volvo, 2019)
Caixa de Marchas AT2612 G	-	342		(Volvo, 2022a)
Semi-reboque tipo baú (15,4m)	+	9300		(Facchini, 2025b)
MCI 184kW ou 368kW	+	212	424	LHMT
Catalisador	+	15	30	LHMT
Máquina elétrica 400kW	+	156 ^b	156 ^b	(Nidec, 2025)
Gerador 183kW ou 367kW	+	86 ^b	145 ^b	(Nidec, 2025)
MASSA FINAL SEM BATERIAS	=	19.028	19.314	-
LIMITE CONTRAN 882			57.000	-

Fonte: Própria.

a: Somada massa de dois reservatório à de 880 litros de etanol.

b: Estimativa através de regressão linear dos valores disponibilizado em tabela.

4.2 Simulações

Como fonte de energia primária dos REEV, as bateria são elemento chave do trem de potência. Cada banco de baterias deve operar com as células (unidades de bateria) em série, resultando, assim, em um tensão de operação adequada aos motores elétricos (subseção 4.2.1).

No entanto, buscando elevar a autonomia do veículo, é possível dispor bancos de baterias em paralelo, mantendo assim a tensão de projeto, enquanto se soma a energia dos bancos adicionais. Um revés, porém pode ser ocorrer, uma vez que a multiplicação de bancos de baterias resulta em carga adicionar ao trem de potência, reduzindo-se, assim, a lotação máxima do veículo, e, por consequência, a sua utilidade como transporte de carga. Desta forma, será avaliado, para cada configuração definida na Tabela 7, o desempenho com quantidades crescentes de bancos de baterias em paralelo.

Para automatizar o processo de simulações, foi desenvolvido um *script* em linguagem *Python* responsável por executar as simulações de cada modelo para 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 75 e 100 bancos de baterias em paralelo, registrando também os valores relevantes de cada uma. Os caminhões com PBT de 23t só serão capazes de transportar até 41 bancos de bateria em paralelo (sem poder transportar nada mais de carga), portanto não são simulados para quantidades maiores de bancos.

É importante também ressaltar que, como o objetivo das simulações é avaliar o desempenho do veículo em condições semelhantes, somente a energia contida nos 980l de combustível devem ser consumida ao final da simulação. Em outras palavras, a energia contida inicialmente nas baterias não pode influenciar no resultado final. Desta forma é importante que o banco de baterias inicie o ciclo sempre com o mesmo nível de carga que concluirá.

4.2.1 Bancos de baterias

O modelo de bateria escolhido para esta simulação foi a E66C do fabricante LG (LG, 2023). Além de tratar-se de um modelo de alta performance, os dados operacionais da E66C, como curvas e mapas, foram gerados e disponibilizados pelo LHMT. Os dados da célula de bateria são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Características da bateria LG E66C.

Princípio Químico	NCM/Grafite	Tensão nominal	3,68V
Capacidade	65,4Ah	Max. Corrente de Descarga	330A
Massa	900g	Max. Corrente de Recarga	110A

Fonte: LG (2023).

Em termos do pacote de baterias, adotou-se uma tensão total de 800V. Este valor é usual em máquinas elétricas, e está em conformidade com os motores elétricos de Nidec (2025). Desta forma, para células E55C, um pacote deve conter 217 unidades em série, resultando em

798,6V. Além disso adotou-se um valor de 80kg correspondente aos demais componentes do pacote, relacionados a estrutura física, sistemas de arrefecimento, circuitos eletrônicos, e demais componentes de controle das baterias. Estimou-se, portanto, 275,3kg de massa para cada pacote de baterias. A massa total dos bancos de baterias é expresso pela Equação 4.1.

$$M_{bat} = n_p \cdot 275,3, \quad (4.1)$$

onde n_p refere-se à quantidade de bancos de bateria em paralelo.

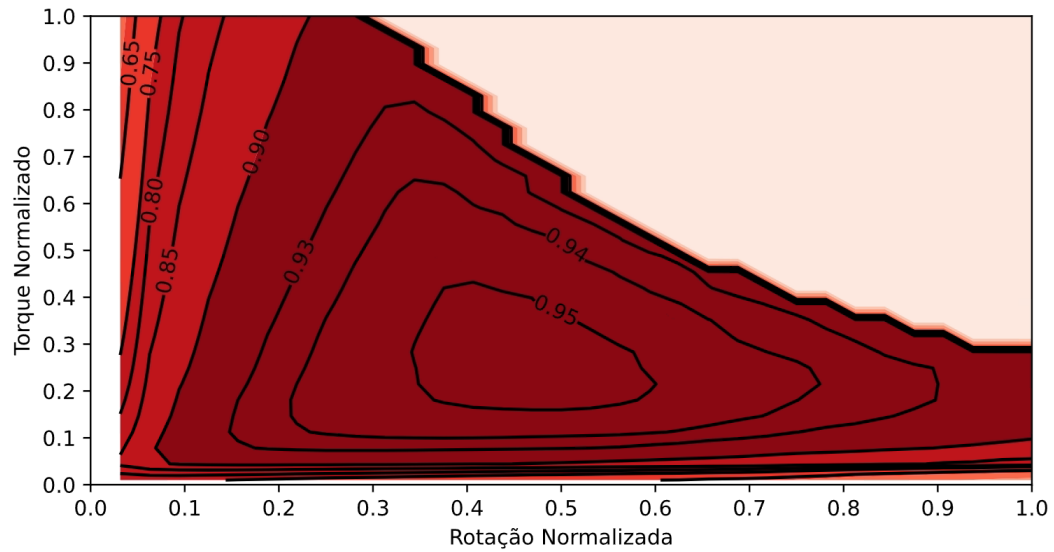
Assim como demanda e rotação correspondem aos eixos dos mapas de MCI, os mapas de baterias veiculares são montados a partir de temperatura e nível de carga, também chamada *state of charge* (SOC). A partir destas mapeia-se as demais grandezas: tensão de circuito aberto, resistência interna, e potências máximas de descarga e recarga. Para fins de simplificação dos modelos assumiu-se que o veículo está equipado com um sistema de resfriamento capaz de manter os pacotes de baterias à temperatura constante de 298,15K. Além disso assume-se também que, dado o clima ameno brasileiro, o banco de baterias também não será submetido a temperaturas inferiores a esta.

Para as baterias E55C observa-se considerável queda de tensão e potência de descarga quando o SOC é inferior a 15%, o que inviabiliza a operação dos motores de tração designados. Assim, é implementado nos modelos uma lógica tal que, uma vez que não haja mais combustível disponível, ao se alcançar a marca de 15% de SOC a simulação deve ser concluída.

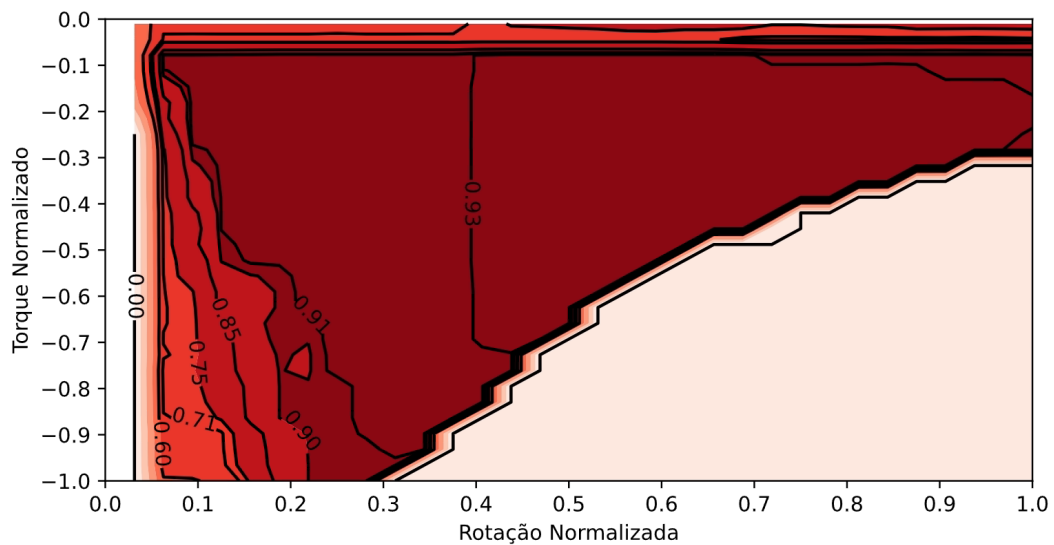
4.2.2 Motores elétricos

Cada modelo faz uso de dois motores elétricos (motor de tração e gerador) ambos conectados aos bancos de baterias. No entanto, a aplicação prática deste tipo de ligação exige conversores de tensão capazes de adaptar a tensão elétrica dos motores à da bateria. Desta forma, para fins de modelagem, tanto a eficiência eletromecânica de um motor elétrico, como a eficiência do conversor de tensão correspondente são condensados no único mapa. Os mapas para as 5 configurações de motor elétrico listadas na Tabela 7 foram gerados por rotinas em plataforma *Python* a partir dos mapas normalizados de motorização e geração da Figura 4, ambos fornecidos pelo LHMT.

Figura 4 – Mapas normalizados de motores elétricos veiculares compensados pela eficiência dos conversores de tensão.



(a) Mapa normalização de eficiência motora.



(b) Mapa normalizado de eficiência de geração.

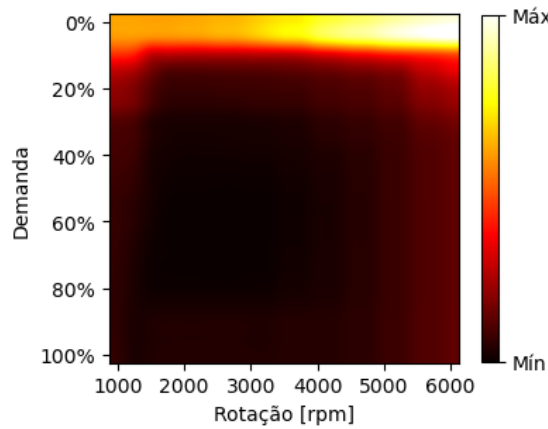
Fonte: Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas - UFC

4.2.3 Mapas de ICE

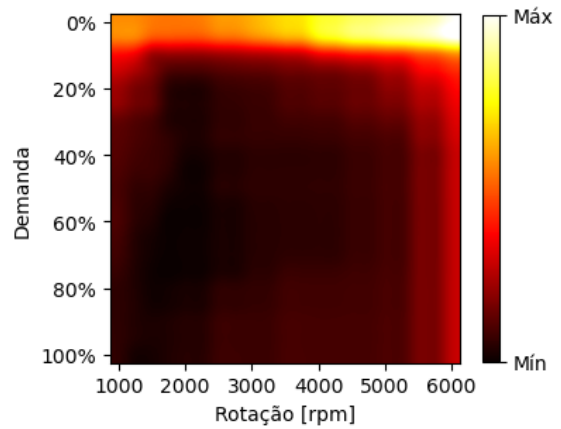
Conforme explicado na seção 4.1, são necessários três níveis de potências diferentes por parte do MCI — 92kW, 184kW e 368kW —, sendo a primeira correspondente a um único motor, e as demais contando com configurações do motores em paralelo. A Figura 5 apresenta os mapas do motor selecionado operando com E100, que darão origem aos mapas das configurações de maior potência. Por questão de sigilo dos dados fornecidos pelo fabricante é necessário que

se omitam os valores correspondentes às cores dos mapas.

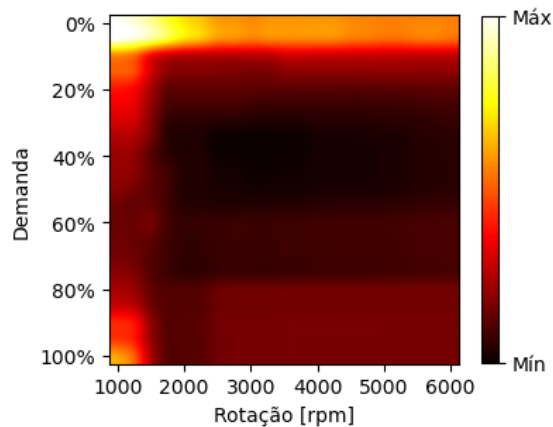
Figura 5 – Mapas do motor 1.0 turbo para veículos consumindo E100.



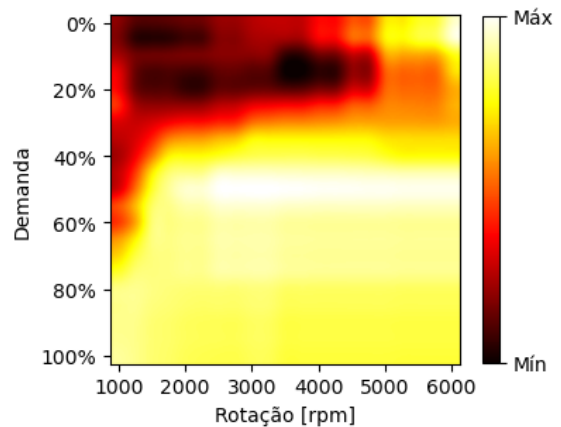
(a) Mapa de consumo de combustível.



(b) Mapa de emissões de CO.



(c) Mapa de emissões de HC.



(d) Mapa de emissões de NOx.

Fonte: Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas - UFC

Se comparados com os mapas da Figura 2, observa-se na Figura 5 particularidades da combustão de E100 em comparação com o E28. Embora o perfil de consumo de combustível seja semelhante em ambos, a formação de HC apresenta um pico de formação adicional para o E100 em rotações próximas à mínima e demandas próximas do 100%. A formação de CO com E100, diferente do caso com E28, eleva-se somente sob demandas muito baixas, atingindo seu pico nas rotações mais elevadas.

Observando-se o mapa de formação de NO_x na Figura 5d, fica evidente a predominância de regiões com elevada formação do gás, em oposição ao mapa para E28. Não obstante, o pico de emissões dos óxidos coincide com as regiões de baixo consumo de combustível, e baixa emissão de CO. Já com relação aos HC, as emissões de NO_x aproximam-se de uma quase

completa oposição, onde regiões de baixas emissões para ambos são raríssimas.

4.2.4 Resistência ao movimento e relação de transmissão

Os coeficientes de resistência ao movimento adotados no *Ignite* pelo bloco do veículo seguem o mesmo modelo representado na seção 2.5 pela Equação 2.7. Desta forma adotou-se a Equação 2.8 para o cálculo dos coeficientes para cada valor de PBT em estudo (ver Tabela 11). Além disso, observou-se que a relação entre velocidade máxima e torque fornecido pelo motor de tração para as rodas tem pouca margem de tolerância para o dimensionamento proposto. Deste modo, por meio de simulações consecutivas, encontrou-se um relação de 1:26 como sendo ideal para todo os modelos.

Tabela 11 – Coeficientes para cálculo de resistência ao movimento.

PBT [kg]	a [N]	b [N/(m/s)]	c [N/(m/s) ²]
23.000	2689,20	0,00	2,88
57.000	5677,20	0,00	4,45

Fonte: Própria.

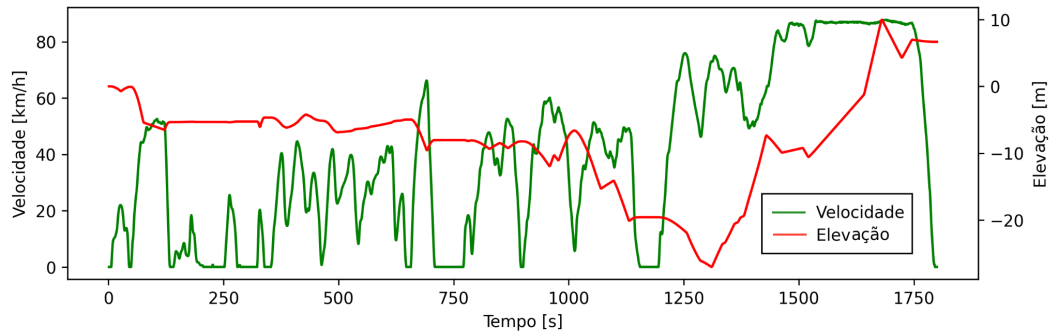
4.2.5 Ciclo de condução

Conforme explicado na seção 2.3 o Brasil adota os ciclo WHTC como padrão para testes em HDV, porém este ciclo de teste não possibilita testes em veículos elétricos ou híbridos. Diante do argumentado na seção 2.4, o ciclo de condução WHVC — como versão equivalente ao WHTC para teste em dinamômetros de chassi — apresenta-se como ciclo ideal para as simulações propostas aqui.

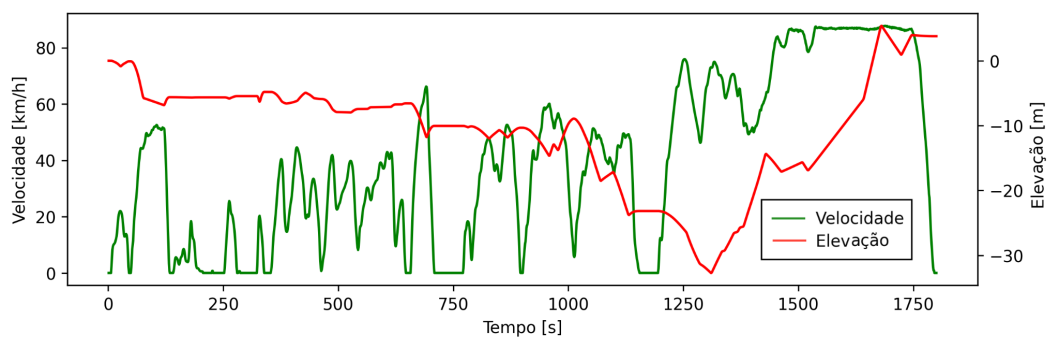
De acordo com UNECE (2021, página 104) o ciclo WHVC apresenta um perfil de velocidade e de declives variando em cada segundo. O declive deve ser calculado a partir da potência efetiva do veículo, de modo que, com base nas potências de 340kW e 400kW definidas na seção 4.1, obtém-se os perfis expressos na Figura 6. Os perfis de velocidade para ambas as potências são idênticos, e, se considerado o ciclo como um todo, o veículo de 340kW conclui o teste com uma elevação de 6,7m enquanto o de 400kW finaliza o ciclo em 3,8m. Porém o perfil de elevação imposto ao veículo de 400kW é um pouco mais exigente. No trecho de autoestrada, entre 1300s e 1700s, os veículos devem, em alta velocidade, subir do ponto de elevação mínima à máxima do ciclo: enquanto na Figura 6a tem-se um total de 37m de aclave total (elevação

mínima de $-27,0m$ e máxima de $10,0m$), em Figura 6b tem-se $38,1m$ (mínimo de $-32,7m$ e máximo de $5,4m$).

Figura 6 – Perfis de velocidade no tempo e elevação no tempo conforme o ciclo de condução WHVC, para as potências estudadas.



(a) WHVC para 340kW.



(b) WHVC para 400kW.

Fonte: Própria

Os perfis de velocidade apresentados na Figura 6 foram implementados aos modelos de caminhão, conforme a potência de seu respectivo motor de tração. Sendo a autonomia dos veículos um dos principais fatores em análise neste estudo, os veículos serão submetidos aos ciclos de condução de forma reiterada até que o reservatório de combustível esteja vazio e o banco baterias tenha alcançado o seu nível inicial de carga.

4.3 Os modelos no Realis Ignite

O estudo unidimensional da dinâmica veicular é uma etapa crítica na concepção de configurações de trens de potência de veículos híbridos. Este estudo deve considerar todos os principais componentes envolvidos no desempenho de um trem de potência, como motores a combustão e elétricos, banco de baterias, ciclos de direção, comportamento do motorista,

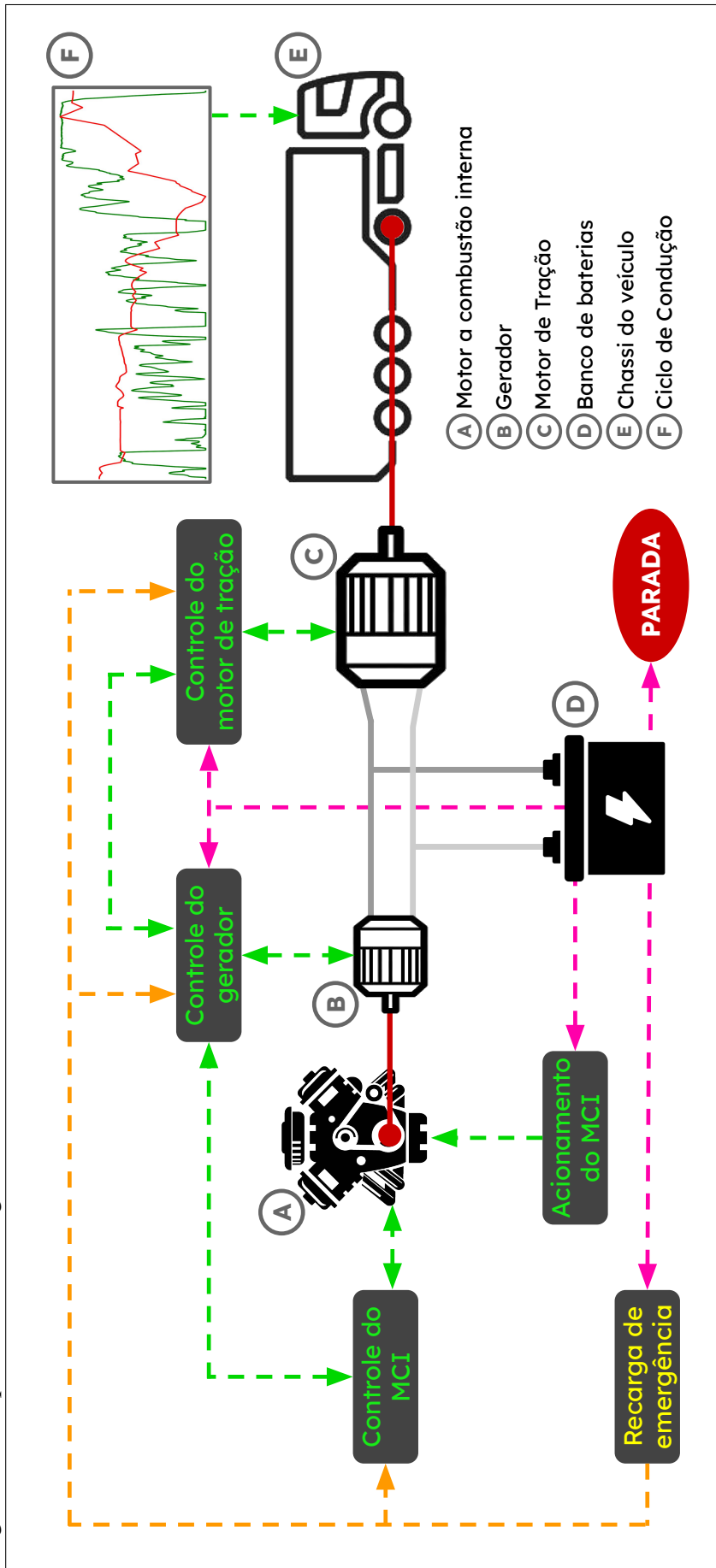
características do veículo como peso, atritos internos e atrito com o ar, dentre outros. Dentre os principais *softwares* comerciais de simulação unidimensional de dinâmica veicular, o *Realis Ignite* se destaca por sua ampla biblioteca de componentes para simulação de trens de potência híbridos, e interface capaz de gerar relatórios completos de desempenho das mais diversas configurações (Realis, 2025).

O *software Ignite* foi desenvolvido pela empresa *Realis*, como parte o seu acervo de ferramentas de auxílio à pesquisas e projetos de veículos automotores. A plataforma opera com modelagem em blocos e é capaz de simular as interações físicas entre diferentes elementos para estudos de dinâmica veicular de trens de potência convencionais, elétricos, com células combustível, híbridos de qualquer tipo, ou com outros elementos não convencionais. Cada bloco se comunica com um ou vários outros, transmitindo e recebendo informações relacionadas à sua função, de modo a possibilitar a modelagem de sistemas complexos totalmente interconectados. Além disso, na análise de resultados, é possível se extrair os valores de cada variável calculada em cada bloco, possibilitando uma análise detalhada do comportamento de cada componente do modelo.

A Figura 7 mostra uma representação esquemática dos modelos de caminhão elétrico REEV desenvolvidas para este trabalho. Os blocos A, B, C, D e E representam os principais componentes do veículo, conectados entre si por linhas sólidas que representam grandezas físicas. As linhas na cor vermelha representam a transmissão de potência entre eixos, contendo as grandezas de torque e rotação. Já as linhas na cor cinza representam a transmissão de potência elétrica — com polos diferenciados pelas cores cinza claro e escuro —, contendo as grandezas de tensão e corrente elétrica. O bloco F, em especial, representa o ciclo de condução que submeterá o veículo a aclives e declives, e exigirá do condutor um determinado perfil de velocidades.

Os demais blocos representam conjuntos de comandos e algoritmos lógicos relacionadas a estratégias de gerenciamento de energia e controle do sistema do REEV. As linhas tracejadas representam comandos e informações trocadas entre os blocos. Na cor rosa está representado o valor instantâneo de SOC do banco de baterias, imprescindível na maior parte das lógicas de controle do modelo. Na cor laranja está representado o alerta de modo de emergência, que modificará o comportamento dos blocos por ele influenciados. Na cor verde estão representadas as demais trocas de informações entre os blocos, seja de leitura de grandezas, seja de sincronia ou mesmo de comandos digitais ou analógicos.

Figura 7 – Esquema de modelagem em blocos de dinâmica veicular de um caminhão elétrico REEV.



Fonte: Própria.

Em uma análise mais detalhada da Figura 7 observa-se que o MCI (A) transmite potência diretamente para gerador (B), que por sua vez transmite sua potência elétrica para o banco de baterias (C), ou mesmo, diretamente para o motor de tração (C). O motor de tração transmite a potência demandada direto para o diferencial dos eixos de tração do caminhão (E). Uma vez que se busca um comportamento ótimo do MCI as irregularidades na demanda do motor elétrico — resultante do ciclo de condução — são supridas pela bateria. O gerador, por sua vez, proverá potência excedente contante e em quantidade suficiente para, ora atender ao motor de tração, ora recarregar o banco de baterias.

O bloco de acionamento do MCI é responsável por controlar tanto o processo de acionamento do motor, como o seu desligamento. Em todos os modelos deste trabalho estabelece-se que o MCI deve ser acionado sempre que o SOC do banco de baterias alcançar um valor inferior a 40%, e desligado quando a carga exceder 90%. Além disso o MCI é permanentemente desligado quando se alcança um consumo total de 980l de combustível.

Já o controle da rotação do MCI é realizado por um bloco distinto. Dois segundos após a partida desse a demanda sobre o gerador será aplicada ao seu eixo, de modo que exige-se um controle na demanda — semelhante ao controle no pedal de um acelerador — buscando estabilizar a sua rotação em um valor ideal. Através de uma análise do mapa na Figura 5a observa-se uma tendência a menor consumo de combustível em torno de 1750rpm, sendo esta, portanto, a rotação padrão buscada para a operação padrão do motor a combustão. O funcionamento padrão do MCI visando um menor consumo de combustível é chamada de operação em "modo econômico".

O controle do gerador, por sua vez, abrange um dos processos mais complexos de todo o gerenciamento de energia do trem de potência. Com base na demanda aplicada ao gerador a energia mecânica do MCI pode ser convertida em energia elétrica até quase a sua potência máxima. No entanto diversos fatores podem limitar esta demanda. Inicialmente deve-se atrasar a demanda do gerador com relação à partida do MCI, de modo a prevenir que o primeiro impeça que o segundo alcance uma operação em regime permanente após a partida. Além disso deve-se avaliar qual a potência máxima de recarga suportada pelo banco de baterias no seu SOC instantâneo, impedindo sobrecarga da mesma. É possível também que, em situações de grande demanda do motor de tração o gerador possa, somado à potência fornecida pelas baterias, fornecer energia diretamente para a tração do veículo.

Diante da escala dos HDV o motor de tração é capaz de demandar potências supe-

riores à capacidade do banco de baterias ou do gerador, quando considerados separadamente. Além disso, através da tecnologia de frenagem regenerativa — estratégia que utiliza o motor de tração para absorver parte da energia da frenagem, convertendo-a em potência de recarga —, este motor é capaz de gerar considerável potência de volta para o banco de baterias. Assim, o bloco de controle do motor de tração garantem que o motor de tração não possa exceder os limite de potência de descarga e recarga estabelecidos pelos mapas das baterias. Além disso, a frenagem regenerativa é totalmente desligada quando o MCI está responsável por recarregar as baterias, de modo a se evitar sobrecargas.

O bloco de recarga de emergência é responsável por alterar a lógica de controle dos blocos A, B e C caso o SOC do banco de baterias alcance a um valor criticamente baixo. Caso, mesmo com o MCI ligado, o SOC atinja valores inferiores a 30%, será dado início ao modo de recarga de emergência. Enquanto este modo estiver operante o parâmetro de menor consumo de combustível é substituído pela busca por uma potência máxima. O modo de emergência é mantido até que se reestabeleça 50% da carga das baterias. Neste modo, tanto a demanda do gerador como o MCI operam buscando fornecer a máxima potência suportada somando-se bateria e motor de tração. Além disso a potência demandada e gerada pelo motor de tração são considerados no balanço, de modo a se minimizar situações de descarga e maximizar situações de recarga do banco de baterias.

Por fim o bloco na cor vermelha é responsáveis por parar a simulação quando a bateria atingir o SOC mínimo permitido: 15%. Vale ressaltar que, conforme descrito na seção 4.2, para que não se contabilize a energia inicial das baterias na autonomia do veículo, a carga inicial do banco de baterias também é de 15%.

4.4 Dados coletados

Ao final de cada simulação são registradas e calculadas diversas grandezas importantes na análise dos resultados. Para uma primeira análise dos resultados, registra-se o volume final de combustível no reservatório e o SOC final do banco de baterias. Caso o volume de combustível seja diferente de nulo ou a carga das baterias superior a 15% deve-se investigar a causa da parada prematura. Esta verificação foi importante durante os teste na concepção dos modelos, tornando-se previsivelmente inócua após alcançada a sua estabilidade.

Além disso, verificou-se a adequação de cada simulação aos requisitos do ciclo de condução. Para tanto faz-se uso dos indicadores de desvio de condução descritos na seção 2.4

através das equações 2.5 e 2.6. Além destes é calculada também a raiz quadrada do erro quadrático médio normalizado, *normalized root mean square error* (nRMSE), como critério próprio de análise, conforme Equação 4.2.

$$nRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v - u)^2}{n}} \cdot \frac{1}{\bar{u}}, \quad (4.2)$$

onde u é a velocidade demandada pelo ciclo de condução, $\bar{u}$ é a sua média na simulação, v é a velocidade efetiva do veículo, n o número de medições realizadas no total da simulação.

Para fins de comparação com a Tabela 4 as emissões de CO, HC, NO_x são computadas em *mg/kWh*. Para tanto calcula-se a média da razão entre a massa de poluente emitido a energia consumida pelo motor de tração na movimentação do veículo.

O consumo de combustível específico é uma medida amplamente utilizada na avaliação de modais de transporte de carga, uma vez que considera objetivamente a quantidade de combustível demandada pelo veículo para transportar uma tonelada de carga em um quilômetro. Com este parâmetro é possível atestar o melhor desempenho logístico de veículos de grande porte, quando comparados com de médio e pequeno porte (IEMA, 2021). Neste estudo, como utiliza-se um combustível não convencional para HDV, o consumo específico de combustível será convertido em consumo energético específico para que se possa comparar com o outros caminhões padrão *Euro VI* e *VII*.

Também é possível aplicar a lógica do consumo específico à emissão de gás carbônico, avaliando-se e comparando-se, da mesma forma, o desempenho ambiental de veículos de carga. Assim, o consumo energético específico C_e e emissão específica de CO₂, E_{e,CO_2} , expressos, respectivamente, em *MJ/t.km* e *g/t.km*, são calculados conforme as equações 4.3 e 4.4.

$$C_e = \frac{V_{combust} \cdot \rho_{E100} \cdot PCI_{E100}}{(Pbt - M_{veic} - M_{bat}) \cdot Dist} \quad (4.3)$$

$$E_{e,CO_2} = \frac{M_{CO_2}}{(Pbt - M_{veic} - M_{bat}) \cdot Dist} \quad (4.4)$$

onde Pbt se refere ao PBT em norma e M_{veic} representa a massa do veículo, ambos indicados na Tabela 7. M_{bat} refere-se à massa total dos pacotes de baterias, calculado conforme na Equação 4.1. $Dist$ refere-se à distância total percorrida pelo veículo, resultante de cada simulação, enquanto $V_{combust}$ é o volume total de combustível consumido, correspondente a 980 litros para todas as

simulações. Já ρ_{E100} e PCI_{E100} referem-se, respectivamente, à densidade e ao poder calorífico inferior (PCI) do etanol hidratado, ambos obtido em ANP(Brasil) (2021).

4.5 Estratégia de validação dos modelos

Como já descrito na seção 3.3, a tecnologia de REEV está em estágio inicial de entrada no mercado automobilístico, com produtos comerciais restritos à escala de LDV. Portanto não se tem a disponibilidade dados suficientes de desempenhos de HDV com a esta tecnologia para que se validem os modelos desenvolvidos neste trabalho. Por outro lado, embora a participação dos HDV do tipo BEV no mercado seja tímida, já se dispões de dados de desempenho deste tipo de veículos na bibliografia. Em seu trabalho, Hensher & Wei (2024) avaliam cenários considerando o desempenho de diversos caminhões *diesel*, FCEV e BEV.

Desta forma, propões-se que a validação dos modelos utilizados neste trabalho seja através da validação das dinâmicas veiculares das simulações operando sem autonomia estendida pelo MCI, ou seja em condições que tornam os REEV comparáveis a BEV. A atuação do MCI no modelo pode ser resumida à leitura dos mapas apresentados na subseção 4.2.3, que por sua vez são obtidos a partir de medições reais, validadas pelo LHMT. Além disso, a potência deste motor é integralmente convertida em energia elétrica, de modo que o MCI não age diretamente sobre a dinâmica de movimentação do veículo. Portanto, a sua ação sobre o modelo não compromete a validação da dinâmica veicular em configuração BEV.

Assim, o processo de validação consiste na implantação das mesmas estratégias de simulação apresentados na seção 4.2, porém, configurando-se o veículo para operar como um BEV. Para tanto, as simulações dos modelos nas diversas configurações de baterias são sempre iniciadas com SOC igual a 100% e com volume de combustível nulo. Por fim, os resultados podem ser comparados com o desempenho típico de BEV apresentados pela literatura.

5 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os principais resultados das simulações realizadas. Avalia-se inicialmente a validade das simulações em termos de consistência e conformidade com o demandado. Em seguida analisa-se o desempenho dos modelos em termos de autonomia, capacidade e consumo energético. Na sequência são observadas as emissões de CO₂ e a sua correlação com o desempenho, seguida pelas demais emissões de poluente. Por fim são apresentados e discutidos os ciclos das simulações com melhor desempenho, com foco no comportamento do SOC.

5.1 Validação

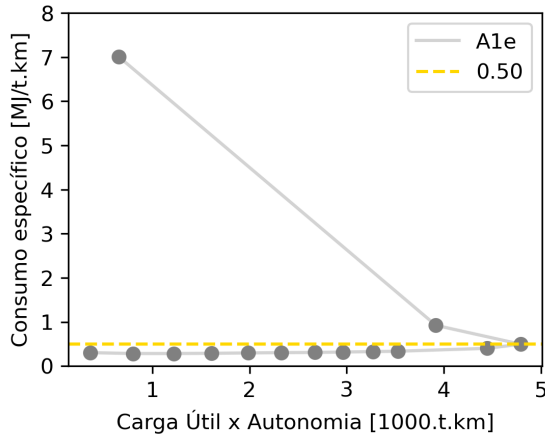
Conforme descrito na seção 4.5, a validação dos modelos desenvolvidos se dá por meio da validação da dinâmica veicular dos mesmo modelos operando de forma totalmente elétrica. Os gráficos na Figura 8 apresentam as curvas de desempenho das simulações dos modelos BEV, identificadas com um sufixo "e" e na cor cinza, em contraste com o desempenho para a mesma categoria de caminhões elétricos apresentado por Hensher & Wei (2024).

Os gráficos apresentam no eixo vertical o consumo específico apresentado por cada simulação, ao passo que no eixo horizontal expressa a autonomia útil do veículo, descrita em termos do produto entre carga útil transportada e autonomia (distância total percorrida pelo veículo). Observa-se, em todos os modelos uma tendência a elevação substancial da autonomia útil com o aumento da quantidade de baterias em detrimento de uma pequena elevação do consumo específico. Esta tendência, no entanto, alcança um limite, para além do qual uma elevação na quantidade de bancos de baterias em paralelo leva a uma piora generalizada no desempenho do veículo.

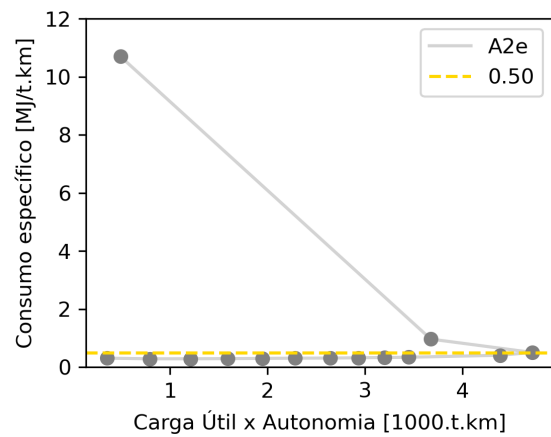
A análise dos gráficos evidencia que as simulações com maior autonomia útil apresentam um consumo específico muito semelhante aos valores reais apresentados pela bibliografia. Nos modelos B2e e B4e é evidente um consumo real ainda inferior ao dos modelos, fato previsível, se considerada o interesse dos fabricantes na otimização dos veículos comerciais para a modalidade totalmente elétrica. Além disso percebe-se uma provável tendência do mercado de caminhões BEV de busca por máxima autonomia útil, que, conforme aprofundado no Capítulo 3, é o ponto fraco deste tipo de HDV.

Diante da afinidade entre os resultados obtidos pelos modelos de BEV e o desem-

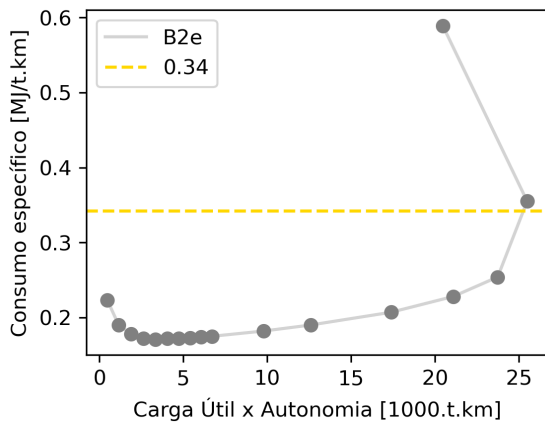
Figura 8 – Desempenho dos modelos em configuração BEV comparados com a bibliografia.



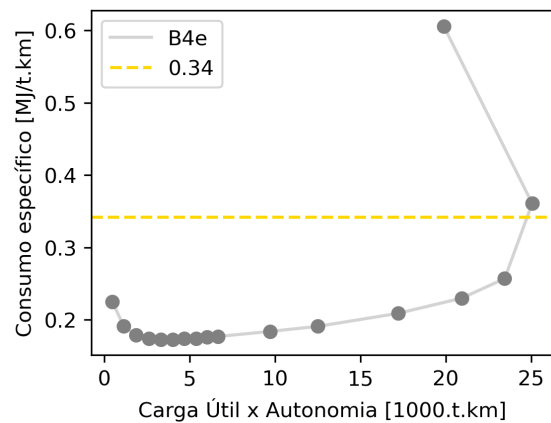
(a) Modelo A1e.



(b) Modelo A2e.



(c) Modelo B2e.



(d) Modelo B4e.

Fonte: Própria.

penho real de veículos equivalentes, pode-se concluir que estes modelos estão validados na perspectiva do estudo de dinâmica veicular de veículos elétricos. Por conseguinte atribui-se validade também aos estudos de dinâmica veicular dos modelos de REEV em foco neste trabalho.

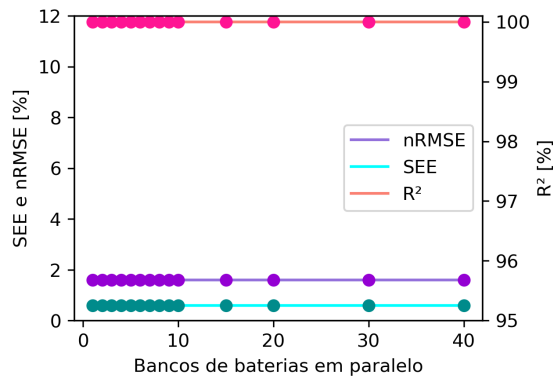
5.2 Conformidade das simulações

Uma vez validados os modelos em estudo, seguiu-se com as simulações dos veículos na configuração REEV, o que resultou na obtenção dos dados descritos na seção 4.4. Em uma análise preliminar observou-se o consumo total de combustível e SOC final das baterias. Atestou-se que todas as simulações foram concluídas com êxito, com consumo completo de combustível e carga final da bateria igual à inicial: 15%.

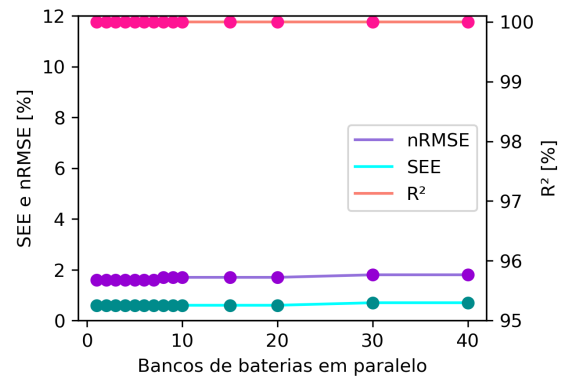
Já com relação ao desvios de condução, a Figura 9 apresenta o nRMSE, *SEE* e R^2 de

todas as simulações realizadas com cada modelo. As configurações A1 e A2 não apresentaram qualquer variação nas métricas, independente da quantidade de bancos de baterias em paralelo. Atribui-se esta consistência à potência do motor de tração, que, embora seja menor que nas configurações B2 e B4, apresenta-se superior ao necessário para transportar as 23t pelo ciclo.

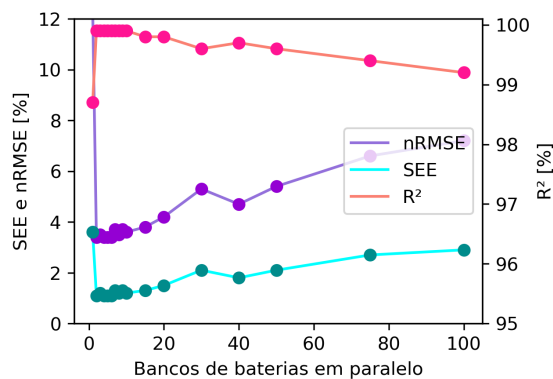
Figura 9 – Métricas de desvio de condução para todas as simulações de cada modelo.



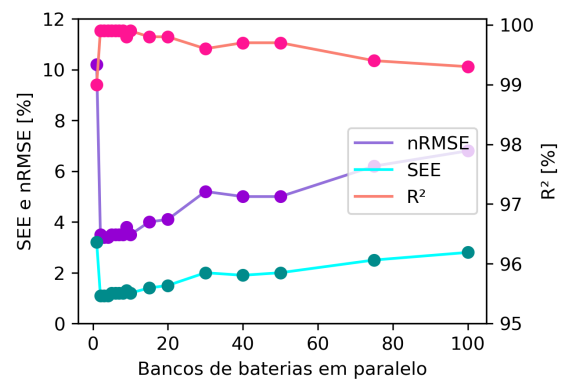
(a) Modelo A1.



(b) Modelo A2.



(c) Modelo B2.



(d) Modelo B4.

Fonte: Própria.

Já para as configurações B2 e B4, observa-se certa dificuldade em atender às demandas do ciclo quando simulados com 1 único banco de baterias. Este comportamento se dá pela incapacidade das baterias de atender à demanda energética nos instantes de maior intensidade do ciclo. Nestas simulações observou-se que as baterias, embora inicialmente com SOC acima de 40%, eram descarregadas rapidamente, atingindo um nível crítico (abaixo de 30%) no qual o seu fornecimento de energia era limitado, impedindo o veículo de acompanhar a velocidade do ciclo.

Nas figuras 9c e 9d observa-se também uma tendência a elevação gradual dos desvios de condução dos modelos à medida que se eleva a quantidade de bancos de baterias em paralelo

a acima de 2. Atribui-se este comportamento à inércia dos bancos de baterias maiores. Dada a alta demanda energética dos veículos de 57t, à medida que se aumenta a quantidade de baterias o excedente energético fornecido pelo gerador torna-se pouco para elevar rapidamente o nível de carga das baterias. Desta forma, com SOC inicial baixo — próximo de 15% — durante uma cada vez maior faixa do ciclo, a capacidade de descarga da bateria é inferior ao demandado pelo motor de tração.

Em UNECE (2021, p.233) é definido de forma objetiva os limites aceitáveis para cada métricas de desvio de condução. Para que o ciclo seja considerado válido o *SEE* não pode exceder 5% e o R^2 não deve ser inferior a 97%. Desta forma conclui-se que, embora com desvios perceptíveis, em termos de conformidade ao ciclo de condução, todas as simulações são consideradas válidas.

5.3 Desempenho

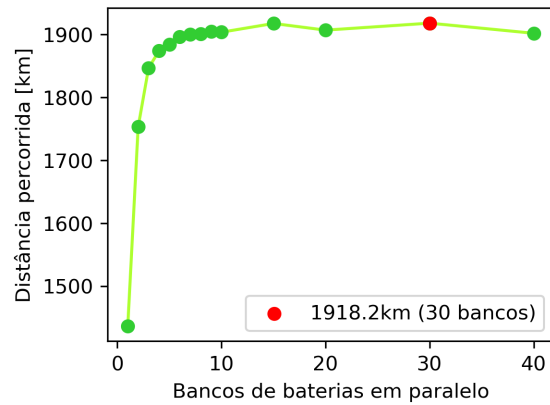
Os gráficos da Figura 10 apresentam a distância máxima alcançada pelos modelos em cada simulação. Os pontos destacados em vermelho representam o valor de distância máxima alcançada pelo modelo em todas as simulações. O seu valor, acompanhado da quantidade de pacotes de bateria correspondente, é representado na legenda de cada gráfico.

Em todos os gráficos observa-se que, com os primeiros aumentos a quantidade de bancos de baterias a distância galgada cresce rapidamente, aproximando-se de um patamar. Para os veículos de 27t a distância máxima estabiliza em torno de 950km enquanto que, para os de 57t, em cerca de 450km. Há de se pontuar, portanto, que existe um limite para a autonomia dos REEV, a depender da escala do veículo. Tal estabilização era esperada, uma vez que a energia fornecida para cada veículo é a mesma.

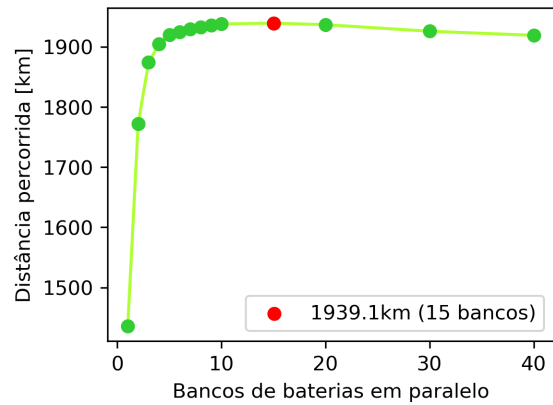
A autonomia do veículo em termos de distância máxima é parâmetro suficiente no dimensionamento de LDV, mas em se tratando de veículos de transporte de carga, a massa de produto transportada é de igual importância. A Figura 11 apresenta o consumo específico de todas as simulações de modelo. Neste caso os pontos vermelhos apontam o menor consumo energético específico alcançado em cada modelo. Nas Figuras 11a e 11b os pontos de consumo específico correspondentes a 40 bancos de baterias em paralelo, com respectivos valores de 26,4MJ/t.km e 39,8MJ/t.km, foram ocultados buscando uma apresentação dos gráficos em escala mais adequada à análise.

Semelhante ao observado para a autonomia, observa-se em todos os gráficos uma

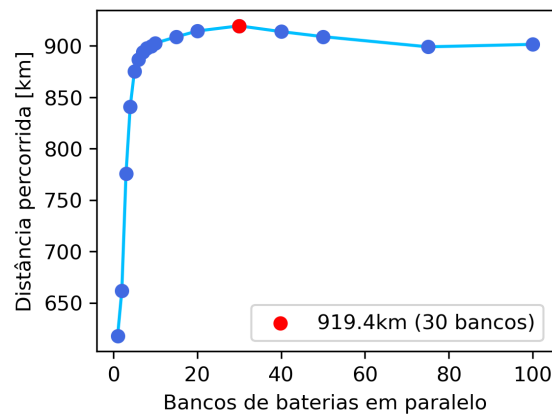
Figura 10 – Distância máxima percorrida pelas simulações de cada modelo.



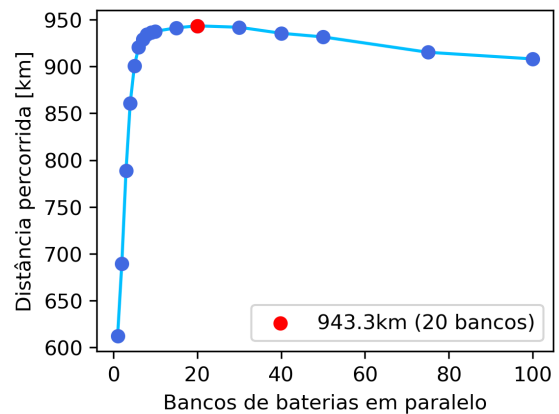
(a) Modelo A1.



(b) Modelo A2.



(c) Modelo B2.



(d) Modelo B4.

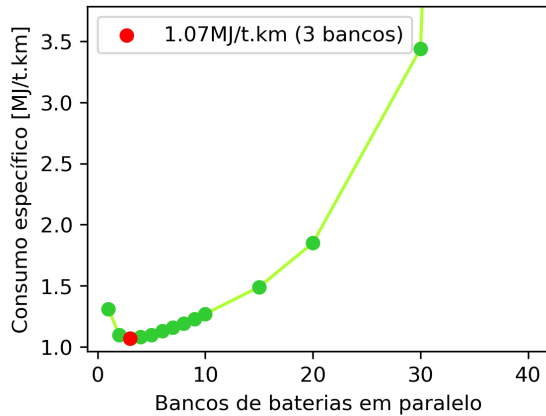
Fonte: Própria.

rápida melhora no desempenho ao longo das simulações com as menores quantidades de bateria. No caso do consumo específico, no entanto, observa-se uma piora no desempenho após um valor mínimo. Este aumento no consumo específico para além do ponto de melhor desempenho é facilmente explicado pela redução gradual da capacidade de carga do veículo devido ao aumento da massa do conjunto de baterias.

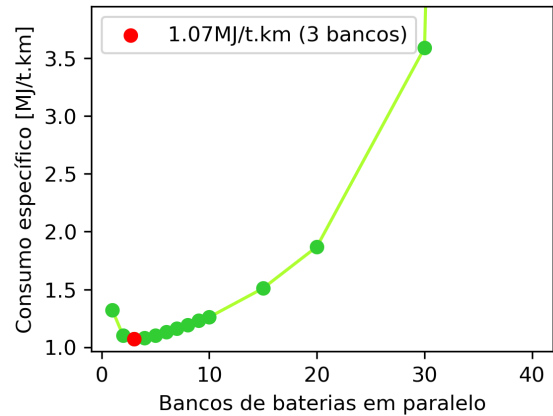
Há de se ressaltar que, conforme esperado, apesar de os veículos menores alcançarem maiores distâncias com a mesma quantidade de energia, são menos eficientes no transporte de carga. Enquanto os modelos A1 e A2 conseguem um mínimo de $1,07MJ/t.km$ com 3 bancos de baterias em paralelo, o modelos B2 e B4 consomem $0,65MJ/t.km$ e $0,63MJ/t.km$ com 6 e 7 banco, respectivamente. Para comparação direta, as curvas de consumo específico de todos os modelos foram desenhadas em um único gráfico na Figura 12.

A Tabela 12 apresenta o consumo energético obtidos com as melhores simulações de

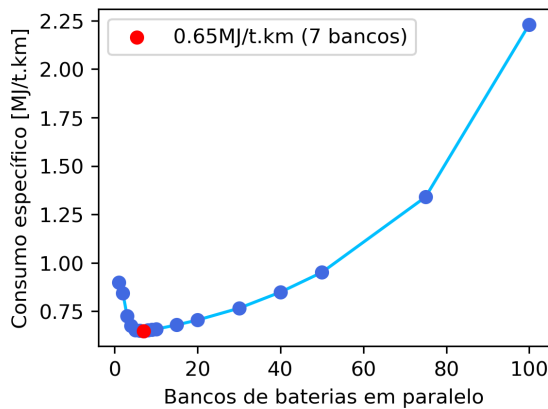
Figura 11 – Variação do consumo específico de energia por tonelada-quilômetro com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para cada modelo.



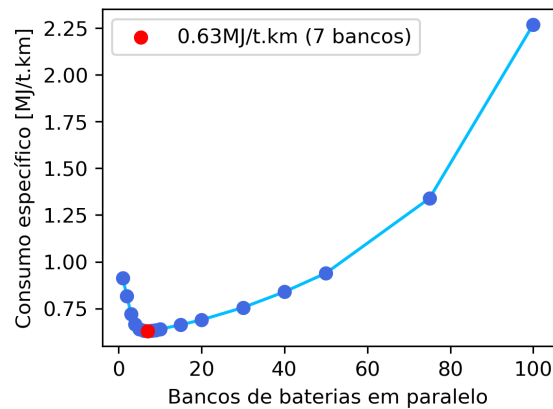
(a) Modelo A1.



(b) Modelo A2.



(c) Modelo B2.



(d) Modelo B4.

Fonte: Própria.

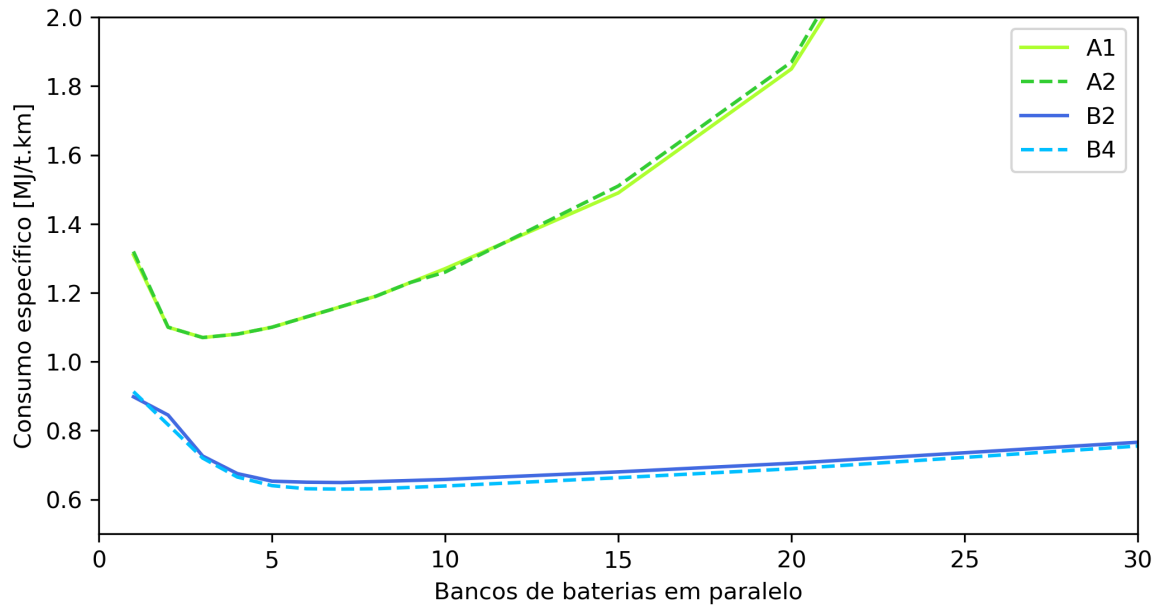
Nota: nos gráficos em (a) e (b) os pontos correspondentes a 40 bancos e $26,4 \text{ MJ/t.km}$, e 40 bancos e $39,8 \text{ MJ/t.km}$, respectivamente, foram ocultados.

cada modelo lado a lado com os valores de referência utilizados por Hensher & Wei (2024). Os veículos A1 e A2 equivalem à designação "3 eixos, rígido" (PBT de $23t$) ao passo que os veículos B2 e B4 são comparáveis ao "7 eixos, articulado" (PBT de $57t$).

Conforme observado na tabela os veículos simulados neste trabalho, REEV operando com E100, apresentam um desempenho energético superior ao das versões diesel *Euro VI* para ambos os tamanhos de caminhão. Já em comparação com BEV os REEV apresentam um consumo energético maior, o que é esperado quando comparada a eficiência de conversão energética de um MCI com a de um motor elétrico. Deve-se ressaltar, por outro lado, as desvantagens dos veículos puramente elétricos apontadas na seção 3.2.

Por fim a Figura 13 apresenta gráficos de autonomia útil — correspondente ao

Figura 12 – Variação do consumo específico de energia por tonelada-quilômetro com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para todos os modelos.



Fonte: Própria.

Tabela 12 – Comparativo de desempenho dos REEV simulados com os dados da literatura.

VEÍCULO	L/tkm	MJ/tkm	FONTE
3 eixos, rígido, Diesel EuroVI	0,041	1,47	Hensher & Wei (2024) ^a
3 eixos, rígido, BEV	-	0,50	Hensher & Wei (2024) ^a
3 eixos, rígido, REEV (E100)	0,050	1,07	Própria
7 eixos, articulado, Diesel EuroVI	0,028	0,98	Hensher & Wei (2024) ^a
7 eixos, articulado, BEV	-	0,34	Hensher & Wei (2024) ^a
7 eixos, articulado, REEV (E100)	0,030	0,63	Própria

Fonte: Própria e Hensher & Wei (2024), conforme indicado.

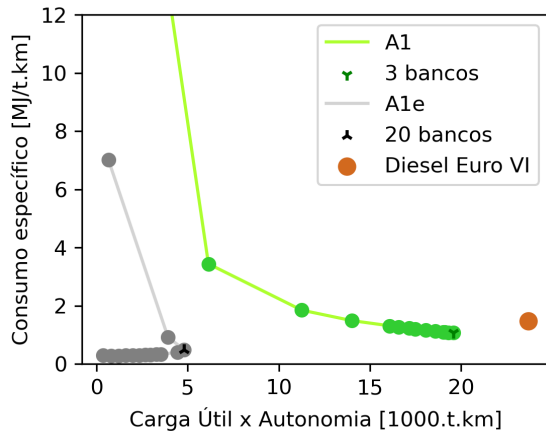
a: Dados convertidos utilizando densidade e PCI em ANP(Brasil) (2021).

produto entre a carga útil e autonomia total — por consumo específico, tanto das simulações de REEV, como de BEV utilizadas na validação dos modelos. Nos gráficos das Figuras 13a e 13b os pontos correspondentes às simulações A1 e A2 com 40 bancos de baterias em paralelo foram ocultados, de modo ajustar a escala do gráfico visando uma melhor compreensão.

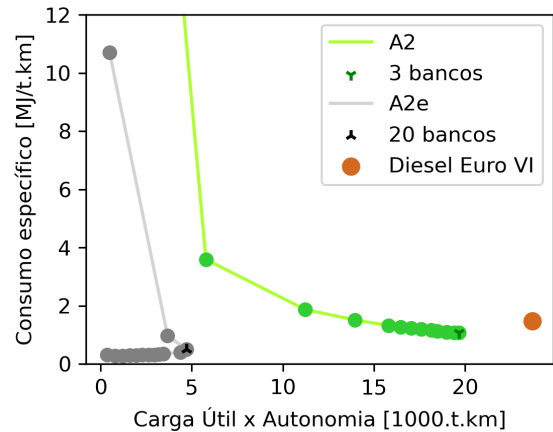
Em cada gráfico ambas as curvas têm destacados os pontos de maior autonomia útil, identificada na legenda pela quantidade de bancos de baterias em paralelo correspondentes. Além disso, o desempenho médio de veículos *diesel* padrão Euro VI, apresentado na Tabela 12, é expresso como ponto na cor laranja.

Em uma análise dos gráficos, quando são comparados os desempenhos dos três modais energéticos, vê-se que os REEV se posicionam como uma tecnologia de transição entre os veículos convencionais e os elétricos. Observa-se que, diferente do que se vê para nas

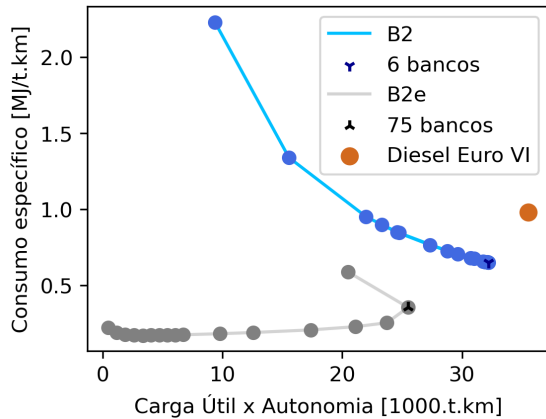
Figura 13 – Gráficos comparativos de consumo específico por autonomia útil para cada modelo REEV e BEV, e veículo *diesel*.



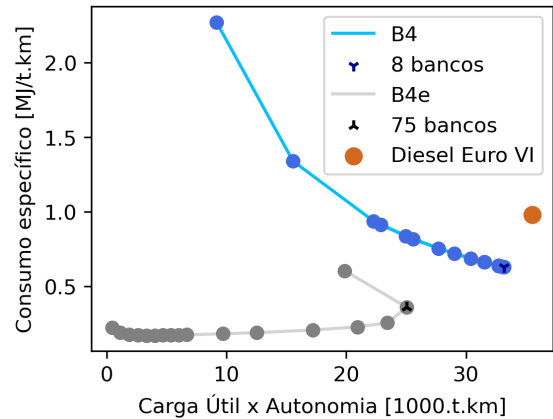
(a) Modelo A1.



(b) Modelo A2.



(c) Modelo B2.



(d) Modelo B4.

Fonte: Própria.

Nota: nos gráficos em (a) e (b) os pontos correspondentes a 761 t.km e $26,4 \text{ MJ/t.km}$ na curva A1, e 576 t.km e $39,8 \text{ MJ/t.km}$ na curva A2, respectivamente, foram ocultados.

curvas de BEV, para todos os REEV os pontos de menores consumos específicos tendem a uma maior autonomia útil. Embora o seu consumo energético seja ainda superior ao dos elétricos, a sua autonomia é expressivamente maior. Além disso, dada a baixa densidade energética dos combustíveis químicos, é possível que se eleve ainda mais a autonomia útil dos híbridos com a elevação do volume dos tanques de combustível, sem grandes perdas no consumo específico.

Em comparação com os veículos *diesel*, percebe-se nos REEV um consumo energético muito inferior, com potencial de autonomia útil muito semelhante. Desta forma os REEV se apresentam com uma solução versátil, com um potencial de aliar o a autonomia de motores a combustão, com a baixo consumo energético dos veículos elétricos e com reduzidas emissões

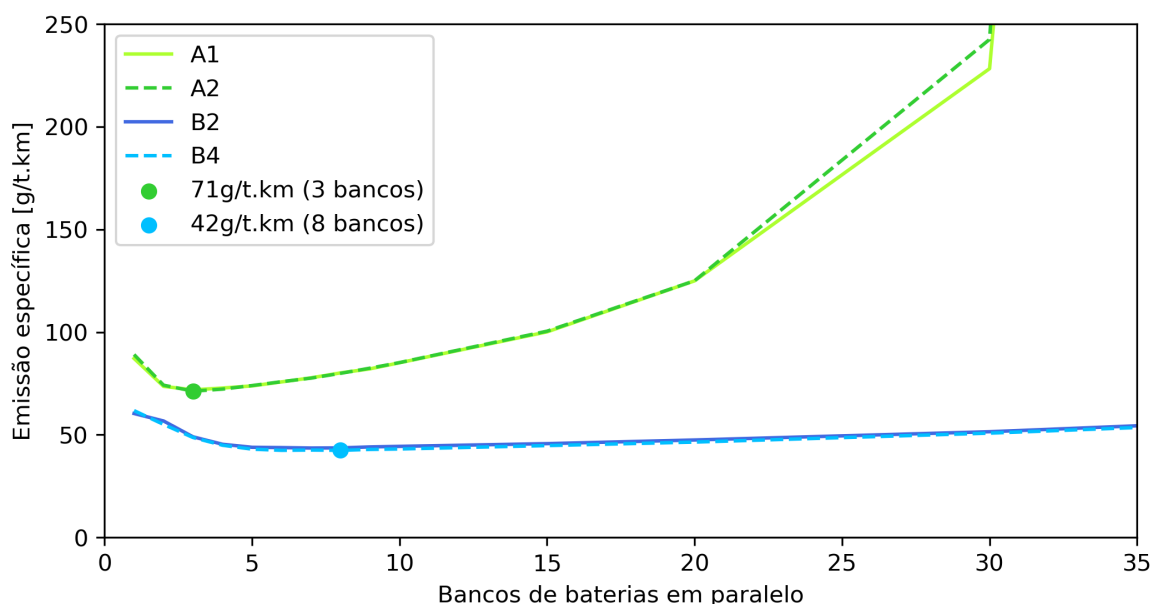
provenientes do uso do E100.

Embora a maior motivação deste trabalho tenha sido a viabilização de tecnologias com menor impacto ambiente, deve-se admitir que o critério econômico é decisivo na tomada de decisão por uma tecnologia de descarbonização. Por isso, considera-se o critério de menor consumo energético como balizador na definição do melhor veículo para cada modelo. Por outro lado, conforme será analisado no próximo capítulo, os dois critérios não estão totalmente dissociados.

5.4 Emissões

A Figura 14 apresenta as curvas de emissões de CO₂ de todos os modelos. Em uma primeira análise vê-se uma semelhança no formato das curvas de consumo e emissões de CO₂, coincidindo, inclusive, os pontos de mínima emissão com os pontos de menor consumo específico. Este fato é fortuito uma vez que permite a conciliação entre o interesse econômico e ambiental.

Figura 14 – Variação da emissão específica de CO₂ por tonelada-quilômetro com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para todos os modelos.



Fonte: Própria.

A aparente equivalência entre as curvas da Figura 12 e da Figura 14 é explicada pelo fato de que quase todo o carbono presente no combustível é convertido em gás carbônico, em uma relação quase proporcional. Esta relação, no entanto, não é exata devido à formação de CO e HC, que contém parte do carbono envolvido na combustão. Neste sentido, a formação de CO₂

é preferível à dos demais poluente, representando uma combustão mais eficiente.

O relatório de Musa *et al.* (2024) apresenta os dados de emissões de CO₂ das diversas categorias de caminhões europeus de 2019 a 2021. Conforme os padrões *vehicle energy consumption calculation tool* (VECTO) os modelos A1 e A2 correspondem ao grupo 9LH (6x2 rígido, com cabine de pernoite) enquanto os modelos B2 e B4 correspondem ao grupo 12 (6x4 articulados). Os valores de emissão específica de CO₂ apontados pelo relatório para os dois grupos descritos apresentam-se na Tabela 13, ao lado dos menores valores obtidos pelos modelos A2 e B4.

Foram também adicionados à Tabela 13 valores de emissão específica calculados a partir dos dados de Hensher & Wei (2024). Em seu trabalho os autores utilizam o fator de 2.003,3 g/l para obtenção de emissão de CO₂ por litro de *diesel*. Da mesma forma a coluna "Austr." foi preenchida com o produto entre este fator e o consumos específicos para caminhões *Euro VI* mostrados na Tabela 12.

Tabela 13 – Comparativo de emissões de CO₂ dos REEV simulados com os dados da literatura.

MODELO	VECTO	DESCRIÇÃO	EMIÇÃO CO ₂ [g/t.km]		
			REEV	ICCT	Austr. ^a
A2	9LH	3 eixos, rígido	72	63	83
B4	12	7 eixos, articulado	43	104	55

Fonte: Própria (coluna REEV), Musa *et al.* (2024) (coluna ICCT) e Hensher & Wei (2024) (coluna Austr.).

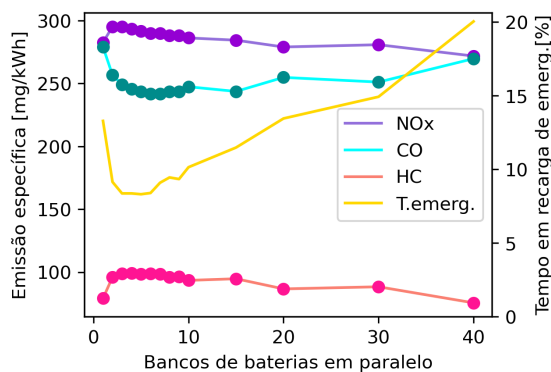
a: Calculado a partir dos dados utilizados por Hensher & Wei (2024).

Comparados às emissões específicas das simulações A2 e B4 com os valores de referência observa-se que as versões de 23t têm emissão entre os valores de referência europeu e australiano. São portanto compatíveis com a realidade dos veículos em operação. Por outro lado os modelos de 57t apresentam emissões específicas de CO₂ inferiores às duas referências, apresentando-se já neste quesito como menos poluente.

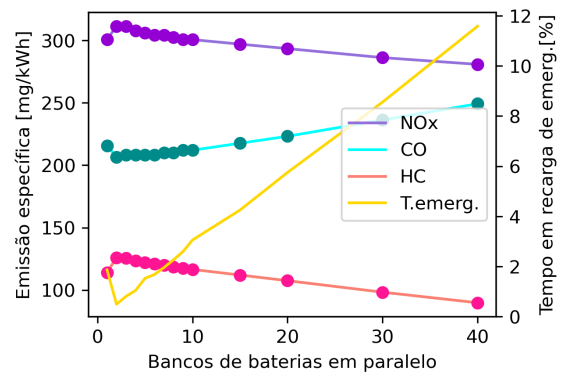
Há de se considerar, porém, que os valores apontados na Tabela 13 são cálculos de emissões diretas de CO₂. Se comparados os ciclos completos de emissões de cada combustível, os veículos operando a biocombustível tem o potencial de abater ainda mais emissões de gases estufa. Como debatido na seção 3.3, avalia-se que a substituição de combustíveis fósseis pode gerar um abatimento médio de 30% (IEA, 2024a) em emissões de CO₂. Além disso, apontam-se estratégias de reduzir estas emissões ainda mais, podendo obter-se até balanços negativos de CO₂ na atmosfera.

No tocante às demais emissões, estas se encontram apresentadas na Figura 15. Cada gráfico apresenta as emissões de NO_x , CO e HC em contraste com o tempo total em que cada simulação permanece em estado de recarga de emergência. Esta última curva é relevante, uma vez que, em modo de emergência, o MCI deixa de operar com maior economia de combustível, buscando, então, uma potência máxima.

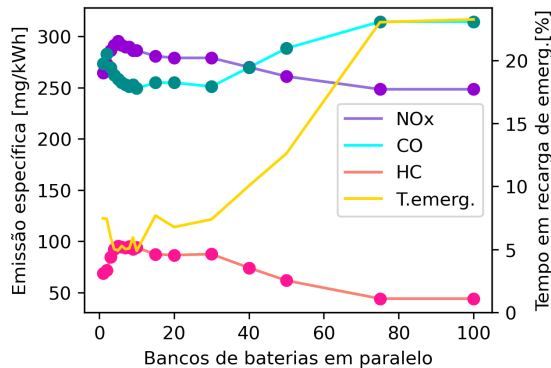
Figura 15 – Variação das emissões de NO_x , CO e HC por unidade de energia com a quantidade de bancos de baterias em paralelo para cada modelo.



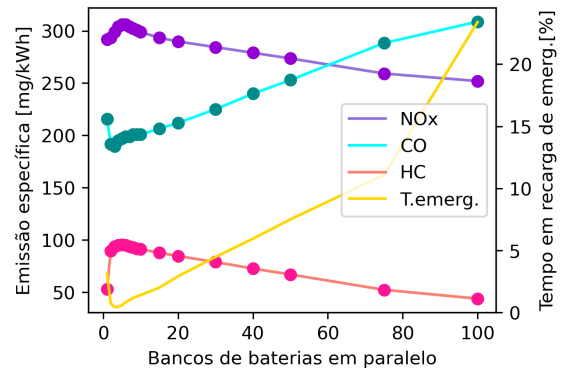
(a) Modelo A1.



(b) Modelo A2.



(c) Modelo B2.



(d) Modelo B4.

Fonte: Própria.

Em todos os gráficos é clara a relação das emissões de CO com o tempo em recarga de emergência. Quando observados os mapas nas figuras 5a e 5b percebe-se uma estreita relação entre menor consumo de combustível e emissões de monóxido de carbono.

Com relação ao HC observa-se uma inesperada inversão entre o consumo de combustível e a sua emissão. De fato, se analisado o mapa da Figura 5c vê-se que a emissão de hidrocarbonetos é relativamente baixa a 1750rpm . Talvez resultados menores fosse alcançados se estabelecida a rotação de 2000rpm para o modo de recarga com economia de combustível.

Fica claro, no entanto, que as emissões atingem um valor mínimo em demanda e rotação elevados (regiões de potência máxima), o que explica a redução nas emissões de HC quando em modo de recarga de emergência.

Na análise das emissões de NO_x da Figura 15 observa-se um comportamento semelhante ao do HC, com valores mais elevados para as simulações com menos tempo em recarga de emergência (e com menor consumo energético específico). Porém, diferente do HC, o mapa na Figura 5d expressa emissões elevadas dos óxidos para quase todo ponto de operação com demanda superior a 40%. Na transição entre o modo de recarga econômico e de emergência representa, na verdade, uma transição de um ponto de emissão elevada de NO_x para outro pouco inferior. para que se opere de fato com emissões reduzidas o veículo precisaria operar com demanda fixa em torno de 20%, o que tornaria injustificada a escolha deste motor.

Em seguida, as emissões da Figura 15 devem ser comparadas com os limites legais indicados nas Tabelas 3 e 4. Os valores encontrado nas simulações de maior emissão CO são cerca de 5 vezes menor que os $1.500\text{mg}/\text{kWh}$ previstos o *Euro VII*, demonstrando um excelente desempenho dos REEV com E100 para este poluente. Na análise dos HC, todos as simulações se enquadram abaixo do limite mínimo atual de $160\text{mg}/\text{kWh}$ (*Euro VII*). Porém, melhorias serão necessárias caso se busque manter as emissões dos modelos de menor consumo energético específico abaixo do limite de $80\text{mg}/\text{kWh}$ previstos para 2027 peça *Phase 3* da EPA.

Já os limites legais para o NO_x são mais estreitos. As simulações com menor consumo energético específico apresentam emissões do poluente em torno de $300\text{mg}/\text{kWh}$, ao passo que alcança-se um mínimo de cerca de $250\text{mg}/\text{kWh}$ em simulações com pior desempenho. Atualmente o *Euro VI* estabelece um limite máximo de $460\text{mg}/\text{kWh}$, o que valida todas as simulações para esta norma. O atual limite norte americanos, por outro lado, é de $268\text{mg}/\text{kWh}$, admitindo somente os veículos com pior desempenho em termos de consumo energético. Além disso, as próximas etapas das legislações norte americana e europeia preveem limites de, respectivamente, $47\text{mg}/\text{kWh}$ e $200\text{mg}/\text{kWh}$, o que reprovava todas as simulações deste trabalho.

A geração de NO_x é particularmente elevada em MCI queimando etanol (Dias *et al.*, 2024; Weissinger *et al.*, 2025). Além disso, como já discutido, para o MCI selecionado operando com E100 poucas regiões do mapa de emissões deste poluente propiciam valores reduzidos. Porém, conforme aprofundado por Iodice *et al.* (2021), elevadas taxas de compressão — como é o caso do motor utilizado, que faz uso de um turbocompressor — podem ter grande influência nas emissões de NO_x em veículos queimando etanol (seja misturado à gasolina ou não). Desta

forma, é importante que experimentos futuros sejam realizados com diferentes motores operando com E100, para que se avalie o real potencial dos REEV, não só de atender às normas mundiais vigentes, mas as previstas para um futuro próximo.

É importante que se comente sobre as curvas de tempo em recarga de emergência observadas na Figura 15. O tempo em que uma simulação permanece neste modo é estreitamente relacionado com as estratégias de gerenciamento de energia do veículo. No modelos B2 e B4 com 50 ou mais bancos de baterias, devido ao grande volume de energia a ser abastecido pelo gerador, ao longo de todo o circuito não se alcança a marca de SOC superior a 50%, mantendo-se o modo de emergência constantemente ativo.

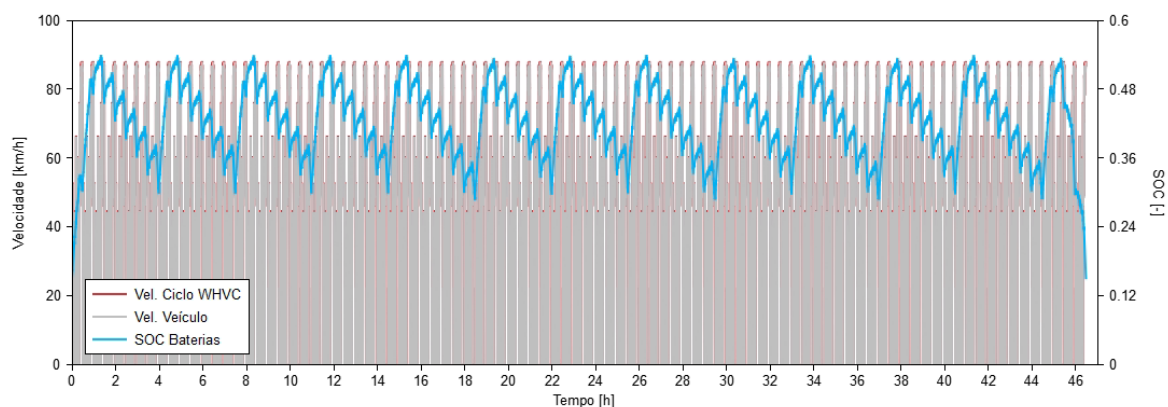
Já para os casos com poucos bancos de baterias observa-se uma pequena elevação do tempo em emergência, resultado da pequena inércia energética do banco de baterias. Uma demanda elevada do motor de tração pode descarregar rapidamente um conjunto de poucas baterias, impedindo que este consiga se manter com nível carga elevada. Tendo em vista que os parâmetros de controle de carga e recarga foram os mesmo para todos os modelos, é possível que se desenvolvam estratégias de gerenciamento de energia mais adaptadas às variações dos modelos, de modo a equilibrar mais adequadamente as emissões de poluentes, mantendo ainda um baixo consumo.

5.5 Modelos com melhor desempenho

Conforme definido na seção 5.3, as simulações de cada modelo com menor consumo específico foram consideradas as mais adequadas, tanto em termos econômicos, como de emissões de CO₂. Para facilitar o entendimento, uma vez que a simulação com menor consumo do modelo A1 foi a que continha 3 bancos de baterias, será doravante chamada A1.3. Da mesma forma, para A2 tem-se a simulação A2.3, para B2 a simulação B2.6 e para B4 a simulação B4.7. Desta forma, debruçou-se um pouco mais sobre cada simulação selecionada, observando-se suas particularidades com relação às demais.

A Figura 16 apresenta um ciclo de teste completo da simulação A1.3. O gráfico apresenta a velocidade demandada por uma sequência de ciclos de condução WHVC na cor vermelha sobreposta pela velocidade do veículo na cor cinza. Esta sobreposição é proposital pois, observa-se com mais clareza regiões em vermelho onde o veículo não foi capaz de acompanhar com perfeição o ciclo de condução. Além disso, observa-se em azul o SOC do dos bancos de baterias, iniciando em 15%, oscilando até um máximo de 50% e concluindo o ciclo em 15%.

Figura 16 – Perfil de velocidade de SOC da simulação A1.3.



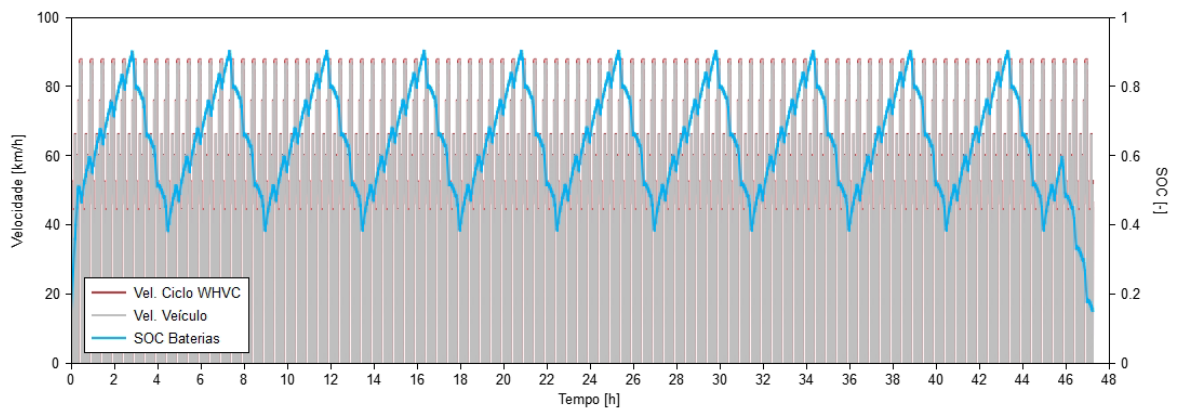
Fonte: Própria.

O modelo A1 é o único com MCI de potência de $92kW$, possuindo, assim, uma capacidade reduzida de recarga. Vê-se que a carga das baterias só alcança 50% após uma curva acentuada, correspondente a uma recarga de emergência. Quando o veículo começa a operar em recarga econômica percebe-se uma descarga em degraus onde as baterias são recarregadas em instantes de baixa demanda do ciclo e sofrem descargas bruscas nos momentos de alta demanda. Destaca-se ao final uma interrupção de um ciclo de recarga de emergência resultante do esvaziamento do tanque de combustível e, conseqüentemente, desligamento do MCI.

Na Figura 17, é apresentado o ciclo completo para a simulação do modelo A2.3. Nesta simulação fica claro o efeito de um MCI com potência maior ($184kW$). A recarga de emergência só é observada no início do ciclo, por uma curva acentuada que é interrompida na marca de 50%. Durante todo o restante do ciclo observa-se recargas em degraus, indicando que, a despeito de pequenas interrupções nos momentos de elevada demanda, o modo de recarga econômico tem potência suficiente para superar a demanda média do ciclo. Além disso, diferente de A1.3, ao alcançar 90% de carga o MCI de A2.3 é desligado completamente, permitindo um período em que o veículo opere de forma exclusivamente elétrica. Quando o SOC alcança novamente 40% o MCI é novamente ligado, operando em regime de economia de combustível.

Em contraste ao ciclo de A1.3, em A2.3 o tempo em recarga de emergência é mínimo, fato que pode ser observado na comparação entre as Figuras 15a e 15b. Enquanto A1.3 alcança um mínimo de cerca de 5 horas em modo de emergência, A2.3 fica em menos de 1 hora. Por outro lado, por possuir um MCI com o dobro da potência de A1.3, em A2.3 o consumo é duas vezes maior, resultando em consumo energético específico virtualmente igual. Por outro lado um maior tempo em recarga de emergência tende a elevar as emissões de CO e reduzir as de NO_x e HC.

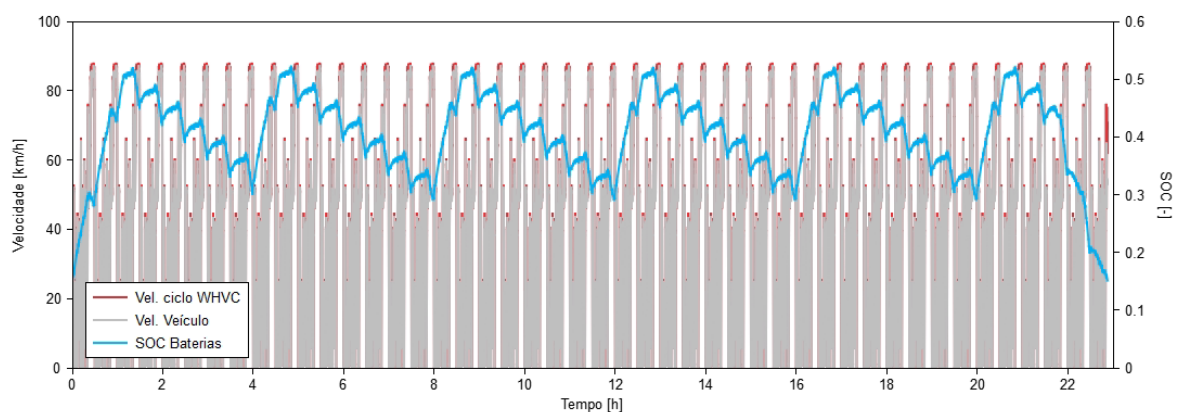
Figura 17 – Perfil de velocidade de SOC da simulação A2.3.



Fonte: Própria.

A Figura 18 apresenta o comportamento da simulação B2.6. O comportamento deste ciclo assemelha-se em grande parte ao de A1.3. Observa-se uma curva de recarga acentuada devido ao modo de emergência, que se encerra em 50%, seguido por um ciclo de descarga em degraus, quando a recarga econômica é incapaz de compensar as descargas das regiões de grande intensidade do ciclo. Quando comparados os ciclos de descarga das baterias em A1.3 e B2.6, percebe-se que o tempo entre os picos de recarga para ambas as simulações é essencialmente o mesmo (cerca de 7 ciclos WHVC, ou 3,5 horas), muito embora o veículo menor, com maior autonomia, apresente mais ciclos de recarga.

Figura 18 – Perfil de velocidade de SOC da simulação B2.7.



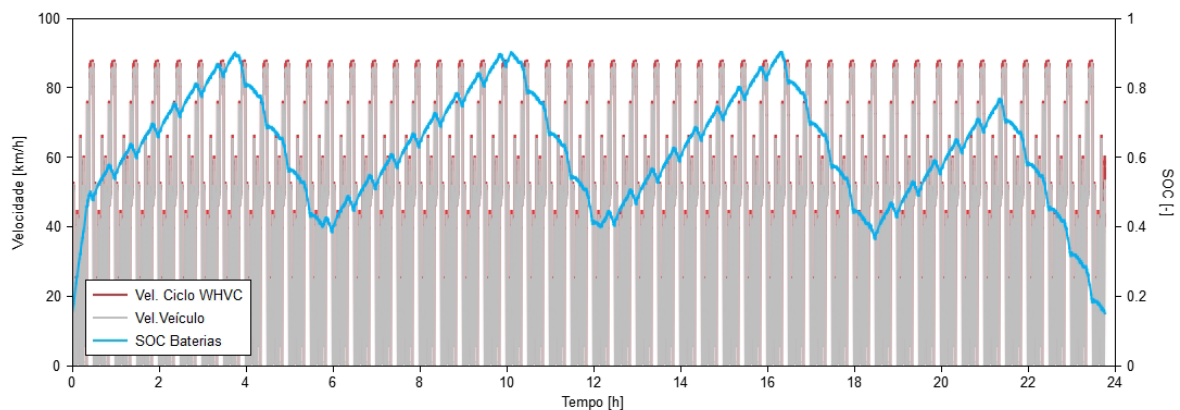
Fonte: Própria.

Há de se ressaltar também que, diferente de A1.3 e A2.3, B2.6 tem mais dificuldades em seguir o ciclo de condução. Fato que se nota pela maior visibilidade da curva vermelha por trás da cinza. Ao final do ciclo, pouco antes da parada, observa-se com mais clareza que, quando a bateria atinge níveis de SOC muito baixos, o motor de tração perde totalmente a capacidade de acompanhar o ciclo. Tal fato é reforçado pelo nRMSE calculado entre a velocidade do ciclo e do

veículo, que para A1.3 e A2.3 é de 1,7%, e para B2.6 é de 3,7%.

Na Figura 19 é apresentada a simulação B4.7. Assim como em B2.6, é possível ver com mais clareza as regiões onde o veículo não é capaz de acompanhar perfeitamente o ciclo, apresentando um nRMSE de 3,8%. Para ambos os veículos isso se deve ao estreito equilíbrio entre a potência do motor de tração, a razão de transmissão entre ele e as rodas, e a carga à qual o trem de potência é submetido. A potência excedente nos veículos de 27t os permite ter reações mais contundentes quando alguma divergência entre as velocidades surge.

Figura 19 – Perfil de velocidade de SOC da simulação B4.7.



Fonte: Própria.

Com relação ao perfil da curva de SOC da simulação B4.7, de forma semelhante à curva de A2.3, tem-se uma recarga de emergência muito breve e intensa no início da simulação, seguida por uma alternância entre períodos de recarga econômica e descargas com MCI desligado. O tempo em recarga de emergência da simulação B2.6 é de cerca de 3h, enquanto para B4.7 é de menos de 0,5h. Neste caso, embora B24.7 consuma o dobro de combustível, a estratégia de economia de energia possibilitou que alcançasse um consumo energético específico pouco inferior a B2.6. Com $0,633 MJ/t.km$ a simulação B4.7 é a mais econômica dentre todas as que envolveram este trabalho.

Além das simulações com ciclos WHVC, os veículos de melhor desempenho foram submetidas a ciclos de teste específicos com o intuito de aferir a velocidade em três diferentes condições. Primeiramente submeteu-se o veículo a um ciclo de condução linear com velocidade máxima constante de $150 km/h$, com a bateria em 100% e MCI, desligado de modo a se observar a máxima velocidade alcançada pelo veículo. Em seguida o veículo foi submetido a um perfil de velocidade decrescente durante o modo de recarga econômica, onde foi aferida a velocidade na qual o MCI tem capacidade de sustentar a carga da bateria em um valor fixo, chamada de

velocidade de suporte de carga ou *charge sustained*. Por fim o mesmo teste de suporte de carga é repetido para o veículo em modo de recarga de emergência. Todos os testes foram realizados sem inclinação de terreno. Os resultados estão listados na Tabela 14.

Tabela 14 – Velocidades máximas dos veículos com melhor desempenho de cada modelo.

Modelo	Bancos em Paralelo	V_{max} [km/h]	Vel. Suporte de Carga [km/h]	
			Econômico	Emergência
A1	3	92,7	53,4	85,8
A2	3	92,7	81,9	>92,7
B2	7	92,7	68,9	92,6
B4	7	92,7	79,4	>92,7

Fonte: Própria.

Nota: Inclinação do terreno de 0%.

Como consequência de uma mesma relação de transmissão, dado que os motores de tração podem fornecer torque correspondente à carga demandada, as velocidades máximas de todos os veículos são iguais. Sugere-se em estudos posteriores o ensaio com declives gradualmente maiores, de modo a se encontrar o declive máximo admitido por cada veículo.

As velocidades de suporte de carga em modo de recarga econômica são consequência de uma potência limitada por parte do MCI nesta região do mapa de consumo. Ainda assim, para os veículos A2.3 e B4.7 esta velocidade aproxima-se da máxima, fato que justifica a recarga até 90% nas simulações destes veículos com a sequência de ciclos WHVC. Já em modo de recarga de emergência os veículos A2.3 e B4.7 alcançaram a velocidade máxima ainda com potencial de recarga da bateria, o que indica que o MCI pode estar superdimensionado para estas configurações. Por outro lado o veículo A1.3 não alcançou valores tão próximos, sugerindo um subdimensionamento do MCI, uma vez que em uma situação de demanda intensa constante o modo de recarga de emergência não seria capaz de sustentar a carga da bateria.

Já para o veículo B2.6 o dimensionamento do MCI aproxima-se do ideal para manter a carga da bateria enquanto o veículo é submetido a uma velocidade equivalente à máxima. Deve-se ponderar, no entanto, que em situações de condução real o veículo pode enfrentar declives diversos, além de outros obstáculos que forçam o veículo a sair do estado de velocidade máxima permanente. O teste em ciclos de condução normatizados, como o WHVC, leva em conta todas estas variações. Desta forma, mantém-se a constatação de que o melhor veículo simulado é o B4.7.

6 CONCLUSÕES

Diante do percentual que ocupam dentro do setor de transportes e do seu potencial poluente, os caminhões demandam atenção especial da comunidade científica. A extensa revisão bibliográfica deste trabalho avaliou as linhas de pesquisa, abordagens e soluções implantadas no mundo para mitigar o impacto climáticos causado pelos caminhões. O panorama mundial aponta para a eletrificação como solução ideal de curto e médio prazo, uma vez que todas tecnologias envolvendo hidrogênio apresentam baixo grau de maturidade. Por outro lado, a capacidade de transportar cargas por longas distâncias é uma característica essencial em caminhões, e a eletrificação dos mesmos demanda estratégias de recarga eficientes para compensar a baixa densidade energética das baterias. Enquanto na UE diversas tecnologias envolvendo recarga ultra rápida e recarga em estrada via catenárias aéreas são implantadas, a China investe em tecnologias estações de troca de baterias.

A realidade brasileira não conta atualmente com investimentos governamentais em tecnologias de suporte à eletrificação veicular, de modo que caminhões elétricos na configuração REEV apresentam uma solução individual viável para o país. Além disso, diante do histórico nacional em pesquisa, produção e implantação de projetos envolvendo etanol, a combinação da tecnologia dos REEV com o potencial de redução de emissões do biocombustível é entendida como estratégia de grande potencial para o Brasil.

Os 4 modelos de caminhões REEV desenvolvidos no software *Realis Ignite* tiveram a sua dinâmica veicular validada em comparação com o desempenho de BEV da literatura. As simulações de cada modelo, com 17 diferentes configurações de bancos de baterias, foram exitosas. Além disso, todas as simulações mostraram conformidade adequada ao ciclo de condução, com métricas de desvios de condução — desvio padrão estimado (SEE) e coeficientes de determinação (R^2) — compatíveis com os limites estabelecidos em norma.

Para os modelos A1 e A2 as simulações A1.3 e A2.3 (com 3 bancos de baterias em paralelo) obtiveram menor consumo energético específico, ambas com $1,07MJ/t.km$. Já Para o modelo B2 o menor consumo específico foi de $0,649MJ/t.km$ alcançado pela simulação com 6 baterias, B2.6. Por fim o modelo B4, combinado com 7 bancos de baterias em paralelo (B4.7) obteve o menor consumo específico de todos: $0,663MJ/t.km$.

Quando comparados com a literatura os veículos A1.3, A2.3, B2.6 e B4.7 apresentam consumo inferior ao de veículos *diesel Euro VI* em todos os casos. Além disso, o contraste entre consumo específico e autonomia útil dos REEV com os BEV e com os *diesel* evidencia que,

além de um consumo energético intermediário, os híbridos apresentam autonomia útil superior aos elétricos e comparável aos *diesel*. Tal resultado indica que REEV a etanol como solução potencialmente competitiva para caminhões pesados.

No tocante às emissões de CO₂, os veículos A1.3 e A2.3 apresentam valores inferiores aos da realidade australiana, porém, ainda acima da média europeia na mesma categoria. Por outro lado os veículos B2.6 e B4.7 apresentaram emissões de CO₂ inferiores a todas as médias comparadas. Estes resultados apontam os REEV a etanol também como soluções viáveis em estratégias de descarbonização para o setor de caminhões pesados.

Já quanto as emissões de NO_x, CO e HC, os quatro veículos selecionados apresentaram valores de emissões semelhantes, estando todos abaixo dos limites estabelecidos pelo *Euro VI*. Em contraste as emissões de CO são 5 vezes inferiores aos limites previstos para o padrão *Euro VII*. Porém, caso o objetivo seja se adequar aos limites de emissões *Euro VII* ou EPA *Phase 3*, em vigor nos próximos anos, melhorias devem ser propostas no intuito reduzir as emissões de HC e NO_x. A adoção de motores sem turbocompressor, com menor taxa de compressão, podem reduzir emissões de NO_x, ao passo que a adoção de catalisadores mais modernos e adequados à combustão do E100 podem reduzir as emissões como um todo.

Diante do que foi observado na avaliação do comportamento dos veículos com menor consumo energético específico, diversos pontos podem ser explorados com o intuito de reduzir emissões e melhorar o desempenho energético dos caminhões REEV a etanol. O dimensionamento de alguns componentes, com base em equipamentos reais pode limitar uma interação mais adequada entre os componentes do trem de potência. Além disso as estratégias de gerenciamento de energia também exercem grande influência sobre a economia e as emissões de poluentes. Para lidar com todos estes fatores propõe-se um estudo de otimização de todos estes componentes, buscando a combinação ideal de todos eles para menor consumo e adequação aos limites futuros de emissões.

REFERÊNCIAS

- ABIPEÇAS; SINDIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante**. 2025. Disponível em: https://sindipecas.org.br/uploads/documentos/1745606295_Relatorio%20da%20frota%20circulante%20-%20abril25.pdf. Acesso em: 05 ago. 2025.
- AGARWAL, A. K.; MOUNAÏM-ROUSSELLE, C.; BREQUIGNY, P.; DHAR, A.; HESPEL, C.; PATEL, C.; SRIVASTAVA, D. K.; DURAISAMY, G.; MOYNE, L. L.; SHARMA, N.; LABHASETWAR, N.; SINGH, P.; DAS, P.; PANIGRAHI, P. K.; SHUKLA, P. C.; SAKTHIVEL, P.; MOHAN, S. V.; PANIGRAHY, S.; SEN, S.; VALERA, H. Future of internal combustion engines using sustainable, scalable, and storable e-fuels and biofuels for decarbonizing transport and enabling advanced combustion technologies. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier Ltd, v. 110, 9 2025. ISSN 03601285.
- AMPAH, J. D.; JIN, C.; AFRANE, S.; YUSUF, A. A.; LIU, H.; YAO, M. Race towards net zero emissions (nze) by 2050: reviewing a decade of research on hydrogen-fuelled internal combustion engines (ice). **Green Chemistry**, v. 26, p. 9025–9047, 2024. ISSN 1463-9262.
- ANP(BRASIL). **Anuário 2020: Fatores Conversão**. Brasília, DF: ANP, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2020/anuario-2020-fatores-conversao.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.
- ASIATIMES. **China leads the adoption of electric long-haul trucks**. 2025. Disponível em: <https://asiatimes.com/2025/07/china-leads-the-adoption-of-electric-long-haul-trucks/#>. Acesso em: 04 ago. 2025.
- ATES, M.; MATTHEWS, R. D. Coastdown coefficient analysis of heavy-duty vehicles and application to the examination of the effects of grade and other parameters on fuel consumption. **SAE International**, SAE International, v. 8, 2012. ISSN 26883627.
- BAE, Y.; MITRA, S. K.; RINDT, C. R.; RITCHIE, S. G. Factors influencing alternative fuel adoption decisions in heavy-duty vehicle fleets. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, Pergamon, v. 102, p. 103150, 1 2022. ISSN 1361-9209. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921004454?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=95c246c2f8811ab0. Acesso em: 14 jun. 2025.
- BAITELO, R.; SILVA, V. O. da. **Integração de Energias Renováveis ao Sistema Elétrico Brasileiro**. 2024. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2024/08/notas_integracao_energia_renovavelIEMA.pdf. Acesso em: 05 ago. 2025.
- BARBOSA, F. C. Heavy duty diesel emission standards regulation evolution review: Current Outcomes and Future Perspectives. **SAE Technical Paper**, São Paulo, n. 2019-36-0174, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2019-36-0174>. Acesso em: 15 jun. 2025.
- BARROS, L. **SP: Prefeitura culpa Enel por atraso no ônibus elétrico e cogita biometano**. 2025. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2025/07/24/biometano-alternativa-onibus-eletricos.htm>. Acesso em: 24 jun. 2025.
- BAUKAL, C. E. (ed.). **Industrial burners handbook**. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2004. ISBN 9780849313868.

BERNARD, M. R.; TANKOU, A.; CUI, H.; RAGON, P.-L. **Charging Solutions for Battery-Eletric Trucks**. [S.l.], 2022. Work conducted for the International Zero-Emission Vehicle Alliance. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/charging-infrastructure-trucks-zeva-dec22.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

BMW. **Veículos Plug-in Híbridos BMW**. 2025. Disponível em: <https://www.bmw.com.br/pt/topics/fascination-bmw/electromobility/hibridos-plug-in.html>. Acesso em: 06 ago. 2025.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Mover: Programa de Mobilidade Verde é lançado**. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/mover-novo-programa-amplia-aco-es-para-mobilidade-verde-e-descarbonizacao>. Acesso em: 05 ago. 2025.

BRAUN, S.; APPEL, L. G.; SCHMAL, M. A poluição gerada por máquinas de combustão interna movidas a *diesel*: a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras. **Quim. Nova**, v. 27, p. 472–482, 2003.

BREUER, J. L.; SAMSUN, R. C.; STOLTEN, D.; PETERS, R. How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. **Environment International**, Pergamon, v. 152, p. 106474, 7 2021. ISSN 0160-4120. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412021000994>. Acesso em: 17 jun. 2025.

BTS. **Moving Goods in the United States**. 2024. Disponível em: <https://data.bts.gov/stories/s/Moving-Goods-in-the-United-States/bcyt-rqmu>. Acesso em: 09 ago. 2025.

BUENO, A. V.; VELÁSQUEZ, J. A.; MILANEZ, L. F. Heat release and engine performance effects of soybean oil ethyl ester blending into diesel fuel. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 36, p. 3907–3916, 2011. ISSN 03605442.

CAI, H.; BURNHAM, A.; CHEN, R.; WANG, M. Wells to wheels: Environmental implications of natural gas as a transportation fuel. **Energy Policy**, Elsevier, v. 109, p. 565–578, 10 2017. ISSN 0301-4215. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151730472X>. Acesso em: 22 jun. 2025.

CAO, W.; ZHANG, J.; LI, H. Batteries with high theoretical energy densities. **Energy Storage Materials**, v. 26, p. 46–55, 4 2020. ISSN 24058297.

CARB, C. A. R. B. **About Advanced Clean Cars Program**. 2025. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/advanced-clean-cars-program/about>. Acesso em: 19 jun. 2025.

CASTRO-DIAZ, L.; GARCÍA, M. A.; VILLAMAYOR-TOMAS, S.; LOPEZ, M. C. Impacts of hydropower development on locals' livelihoods in the global south. **World Development**, Pergamon, v. 169, p. 106285, 9 2023. ISSN 0305-750X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305750X23001031>. Acesso em: 11 jun. 2025.

CLIMATEWATCH. **CO₂ emissions from transport**. 2025. Dados originais por Climate Watch em “Greenhouse gas emissions by sector”. Dados processados por Our World in Data. Disponível

em: <https://archive.ourworldindata.org/20250714-155445/grapher/co2-emissions-transport.html>. Acesso em: 03 ago. 2025.

CNT. **O transporte move o Brasil:** propostas da CNT ao país. 1. ed. 2022. ISBN 978-85-68865-01-9. Disponível em: <https://cdn.cnt.org.br/diretorioVirtualPrd/907973a7-6dc6-4006-b683-9e6ef6bc1505.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2025.

CONAMA (Brasil). Resolução CONAMA Nº 490 de 16 de Novembro de 2018. Estabelece a Fase PROCONVE P8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, n. 223, p. 153-155. 2018. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767. Acesso em: 19 jun. 2025.

CONTRAN (Brasil). Resolução CONTRAN Nº 882 de 13 de Dezembro de 2021. Estabelece os limites de pesos e dimensões para veículos que transitem por vias terrestres, referenda a Deliberação CONTRAN no 246, de 25 de novembro de 2021, e dá outras providências. **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, n. 242, p. 153-159. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao8822021.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CONTRAN (Brasil). Resolução CONTRAN Nº 916, de 28 de março de 2022. Dispõe sobre a concessão de código de marca/modelo/versão, bem como sobre a permissão de modificações em veículos previstas nos arts. 98 e 106 da Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997, que institui o Código de Trânsito Brasileiro (CTB). **Diário Oficial da União:** Seção 1, Brasília, DF, n. 63, p. 96-97. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-contran/resolucoes/Resolucao9162022.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

CULLEN, D. A.; NEYERLIN, K. C.; AHLUWALIA, R. K.; MUKUNDAN, R.; MORE, K. L.; BORUP, R. L.; WEBER, A. Z.; MYERS, D. J.; KUSOGLU, A. New roads and challenges for fuel cells in heavy-duty transportation. **Nature Energy**, v. 6, p. 462–474, 3 2021. ISSN 2058-7546.

DEC, J. E.; CANAAN, R. E. Plif imaging of no formation in a di diesel engine. **SAE Technical Paper Series**, Detroit, n. 980147, p. 176–204, 1998. Disponível em: <https://www.sae.org/content/980147/>. Acesso em: 12 mar. 2025.

DELGADO, O.; RODRIGUEZ, F.; ZACHAROF, N. **Comparison of aerodynamic drag determination procedures for HDV CO2 certification.** Washington, EUA: ICCT, 2019. Disponível em: <https://theicct.org/publication/comparison-of-aerodynamic-drag-determination-procedures-for-hdv-co2-certification/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

DIAS, F. J.; LACAVA, P.; CURTO, P.; PENARANDA, A.; MARTINEZ, S.; WEISSINGER, F.; MARTELLI, A.; SANTOS, L. Decarbonizing light vehicles with hydrous ethanol: Performance analysis of a range-extended phev using experimental and simulation techniques. **SAE MOBILUS**, 4 2024.

DIAS, M. O. de S.; MACIEL FILHO, R.; MANTELATTO, P. E.; CAVALETT, O.; ROSSELL, C. E. V.; BONOMI, A.; LEAL, M. R. L. V. Sugarcane processing for ethanol and sugar in brazil. **Environmental Development**, Elsevier B.V., v. 15, p. 35–51, 7 2015. ISSN 22114645.

DIESELNET. **United States Emission Standards**. 2025. Disponível em: <https://dieselnet.com/standards/us/index.php>. Acesso em: 20 jun. 2025.

DIESELNET. **World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC)**. 2025. Disponível em: <https://dieselnet.com/standards/cycles/whvc.php>. Acesso em: 09 ago. 2025.

DONAHUE, R. J.; BORMAN, G. L.; BOWER, G. R. Cylinder-averaged histories of nitrogen oxide in a d.i. diesel with simulated turbocharging. **SAE Technical Paper Series**, SAE, 10 1994. Disponível em: <https://www.sae.org/content/942046/>. Acesso em: 21 mar. 2025.

DORNOFF, J.; RODRÍGUEZ, F. **Euro 7: The new emission standard for light and heavy-duty vehicles in the European Union**. [S.l.], 2024. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/03/ID-116-%E2%80%93Euro-7-standard_final.pdf. Acesso em: 22 jun. 2025.

EGERSTROM, N.; MULHOLLAND, E.; DORNOFF, J.; MILLER, J.; RODRÍGUEZ, F. **Emission reductions and public health benefits from timely Euro 7 standards**. Washington, EUA: ICCT, 2023. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2023/09/Euro-7-premature-deaths.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

EL-HINNAWI, E. Review of the environmental impact of nuclear energy. **IAEA Bulletin**, International Atomic Energy Agency, Vienna, Austria, v. 20, n. 2, 1977. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/20205083242.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

EPA (EUA). **Fuel Consumption Modeling of Conventional and Advanced Technology Vehicles in the Physical Emission Rate Estimator (PERE)**. 2005. EPA420-P-05-001.

EPA (EUA). **Timeline of Major Accomplishments in Transportation, Air Pollution, and Climate Change**. 2024. Disponível em: <https://www.epa.gov/transportation-air-pollution-and-climate-change/timeline-major-accomplishments-transportation-air>. Acesso em: 19 jun. 2025.

EPA (EUA). **All EPA Emission Standards**. 2025. Disponível em: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/all-epa-emission-standards>. Acesso em: 19 jun. 2025.

EPA (EUA). **Final Rule: Greenhouse Gas Emissions Standards for Heavy-Duty Vehicles - Phase 3**. 2025. Disponível em: [https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy-duty#:~:text=Rule%20Summary%20On%20March%2029%2C%202024%2C%20the,vehicles%20beginning%20in%20model%20year%20\(MY\)%202027](https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/final-rule-greenhouse-gas-emissions-standards-heavy-duty#:~:text=Rule%20Summary%20On%20March%2029%2C%202024%2C%20the,vehicles%20beginning%20in%20model%20year%20(MY)%202027). Acesso em: 19 jun. 2025.

EPE (Brasil). **Balanco Energético Nacional 2025: Relatório Final**. Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf. Acesso em: 16 jun. 2025.

EUROSTAT. **Freight transport statistics: modal split**. 2025. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Freight_transport_statistics_-_modal_split. Acesso em: 09 ago. 2025.

FACCHINI. **Furgão Carga Seca**. 2025. Disponível em: https://www.facchini.com.br/clic?arquivo=fur_csp_2025-BR.pdf&area=produtos. Acesso em: 25 jul. 2025.

FACCHINI. **Semirreboque Furgão Carga Seca**. 2025. Disponível em: https://www.facchini.com.br/clic?arquivo=sem_fcs-br.pdf&area=produtos. Acesso em: 25 jul. 2025.

FENABRAVE. **Anuário 2024**. 2024. Disponível em: <https://www.fenabreve.org.br/anuarios/Anu%C3%A1rio2024.pdf>. Acesso em: 05 ago. 2025.

FENABRAVE. **Emplacamentos**. 2025. Disponível em: <https://www.fenabreve.org.br/portaLv2/Conteudo/emplacamentos>. Acesso em: 12 ago. 2025.

FLYNN, P. F.; DURRETT, R. P.; HUNTER, G. L.; LOYE, A. O. zur; AKINYEMI, O. C.; DEC, J. E.; WESTBROOK, C. K. Diesel combustion: An integrated view combining laser diagnostics, chemical kinetics, and empirical validation. **SAE Technical Paper Series**, 3 1999. Disponível em: <https://www.sae.org/content/1999-01-0509/>. Acesso em: 22 mar. 2025.

FORTUNATO SOBRINHO JÚNIOR, M.; HERNANDEZ, M. C. R.; SANTOS, S.; AMORA, A.; REGINA, E.; MORAIS, C. D.; HERNANDEZ, R. Perception of environmental impacts of wind farms in agricultural areas of northeast brazil. **Energies**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, p. 101, 2022. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/1/101>. Acesso em: 11 jun. 2025.

GANESAN, V. **Internal Combustion Engines**. 4. ed. Nova Delhi, Índia: Tata Mcgraw Hill Education Private Limited, 2012.

GAVIMATH, V. V.; RAVURI, S. Developing real-world drive cycles for heavy-duty freight vehicles using on-board diagnostics data. **Transportation Research Procedia**, Elsevier B.V., v. 82, p. 158–174, 1 2025. ISSN 23521465. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146524003338?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=95778bbf3ae86f8c. Acesso em: 10 jul. 2025.

GRINSVEN, A. V.; OTTEN, M.; TOORN, E. V. D.; VEEN, R. V. D.; KIRÁLY, J.; BERG, R. V. D. **Alternative fuel infrastructures for heavy-duty vehicles**. [S.l.], 2021. Disponível em: [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690901/IPOL_STU\(2021\)690901_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2021/690901/IPOL_STU(2021)690901_EN.pdf). Acesso em: 15 jun. 2025.

HAO, X.; CAO, M.; LI, L.; ZHANG, S.; MENG, X.; LIU, B.; WANG, H. A two-layer programming for highway heavy-duty truck battery swapping stations. **Energy**, v. 321, p. 135461, 4 2025. ISSN 03605442.

HE, H.; YANG, L. **China's stage 6 emission standard for new light-duty vehicles (final rule)**. Washington, EUA: ICCT, 2017. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/China-LDV-Stage-6_Policy-Update_ICCT_20032017_vF_corrected.pdf. Acesso em: 23 jun. 2025.

HENSHER, D. A.; WEI, E. Energy and environmental costs in transitioning to zero and low emission trucks for the australian truck fleet: An industry perspective. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Pergamon, v. 185, p. 104108, 7 2024. ISSN 0965-8564. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856424001563>. Acesso em: 15 jun. 2025.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. Nova York, EUA: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 9781260116106.

IBISWORLD. **Freight Trucking in China: Market Research Report (2014-2029)**. 2024. Disponível em: <https://www.ibisworld.com/china/industry/freight-trucking/755/>. Acesso em: 09 ago. 2025.

IEA. **Energy Technology Perspectives 2020**. IEA, 2020. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020/technology-needs-in-long-distance-transport#abstract>. Acesso em: 22 jun. 2025.

IEA. **Global energy-related CO2 emissions by sector**. IEA, 2021. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector-2020>. Acesso em: 22 jun. 2025.

IEA. **World Energy Balances**. IEA, 2023. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-balances>. Acesso em: 22 jun. 2025.

IEA. **Carbon Accounting for Sustainable Biofuels**. IEA, 2024. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: www.iea.org/reports/carbon-accounting-for-sustainable-biofuels. Acesso em: 22 jun. 2025.

IEA. **Electricity 2024**. IEA, 2024. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IEA. **Trucks & buses**. IEA, 2024. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/transport/trucks-and-buses>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IEA. **Electricity Information**. IEA, 2025. Licença: Terms of Use for Non-CC Material. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/electricity-information>. Acesso em: 28 jun. 2025.

IEA. **Global EV Outlook**. IEA, 2025. Licença: CC BY 4.0. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 27 jun. 2025.

IEA. **World Energy Statistics and Balances**. IEA, 2025. Licença: Terms of Use for Non-CC Material. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/world-energy-statistics-and-balances>. Acesso em: 15 jun. 2025.

IEFFA. **Surging electric truck sales stall China's LNG trucking boom**. 2025. Disponível em: <https://ieefa.org/resources/surging-electric-truck-sales-stall-chinas-lng-trucking-boom-0>. Acesso em: 04 ago. 2025.

IEMA. **Metodologia EPL-IEMA para Emissões de GEE e Poluentes Locais**. 2021. IEMA online. Acordo de Cooperação Técnica – EPL e IEMA. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/11/20210628_EPL_IEMA.pdf. Acesso em: 16 ago. 2025.

IODICE, P.; AMORESANO, A.; LANGELLA, G. A review on the effects of ethanol/gasoline fuel blends on nox emissions in spark-ignition engines. **Biofuel Research Journal**, Green Wave Publishing of Canada, v. 8, p. 1465–1480, 9 2021. ISSN 22928782.

IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report**. Genebra (Suíça): IPCC, 2023. 35-115 p. Contribuição dos Grupos de Trabalho I, II e III para o Sexto Relatório de Análise do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ITF. How Governments can Bring Low-emission Trucks to Our Roads – and Fast. [S.l.], 2023. Policy Papers No. 127. Disponível em: www.itf-oecd.org/how-governments-can-bring-low-emission-trucks-our-roads-fast. Acesso em: 03 ago. 2025.

JARAMILLO, P.; RIBEIRO, S. K.; NEWMAN, P.; DHAR, S.; DIEMUODEKE, O. E.; KAJINO, T.; LEE, D. S.; NUGROHO, S. B.; OU, X.; STRØMMAN, A. H.; WHITEHEAD, J. Transport. In: SHUKLA, P.; SKEA, J.; SLADE, R.; KHOURDAJIE, A. A.; DIEMEN, R. van; MCCOLLUM, D.; PATHAK, M.; SOME, S.; VYAS, P.; FRADERA, R.; BELKACEMI, M.; HASIJA, A.; LISBOA, G.; LUZ, S.; MALLEY, J. (Ed.). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** Cambridge, Reino Unido; Nova York, EUA: Cambridge University Press, 2022. Cap. 10. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_Chapter10.pdf. Acesso em: 10 jun. 2025.

JIN, L.; BRAUN, C.; MILLER, J.; BUYASSE, C. **Climate and health benefits of policies to address emissions from heavy-duty vehicles.** Washington, EUA: ICCT, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/benefits-HDV-policy-FS-global-jul2021.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

KINNON, M. M.; FORREST, K.; LANE, B.; RINDT, C.; SCHELL, L.; RITCHIE, S.; SAMUELSEN, S. **Pathways Towards a Near-Zero Heavy Duty Sector.** California, EUA: California Air Resources Board, 2020. Disponível em: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2020-12/16RD011.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

LEACH, F.; KALGHATGI, G.; STONE, R.; MILES, P. The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. **Transportation Engineering**, Elsevier Ltd, v. 1, 6 2020. ISSN 2666691X.

LG. Cell Solutions for Powerful EV Performance. 2023. Disponível em: https://www.lgensol.com/assets/file/202312_LGES_cell_spec_en.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

LI, J.; YANG, B. Quantifying the effects of vehicle technical performance and electricity carbon intensity on greenhouse gas emissions from electric light truck: A case study of China. **Atmospheric Pollution Research**, Elsevier, v. 11, p. 1290–1302, 8 2020. ISSN 1309-1042. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104220301021>. Acesso em: 15 jun. 2025.

LUCCHESI, C.; AZEVEDO, G. B.; MILLARD, P. **Com excesso de energia, setor eólico e solar no Brasil enfrenta crise sem precedente.** 2025. Disponível em: <https://www.bloomberglinea.com.br/2025/06/25/com-excesso-de-energia-setor-eolico-e-solar-no-brasil-enfrenta-crise-sem-precedente/>. Acesso em: 05 ago. 2025.

MADDISON, D.; OGIER, R.; BELTRÁN, A. The disamenity impact of solar farms: A hedonic analysis. **Land Economics**, v. 99, p. 1–16, 2 2023. ISSN 0023-7639.

MCKENNA, R.; LILLIESTAM, J.; HEINRICHS, H. U.; WEINAND, J.; SCHMIDT, J.; STAFFELL, I.; HAHMANN, A. N.; BURGHERR, P.; BURDACK, A.; BUCHA, M.; CHEN, R.; KLINGLER, M.; LEHMANN, P.; LOWITZSCH, J.; NOVO, R.; PRICE, J.; SACCHI,

R.; SCHERHAUFER, P.; SCHÖLL, E. M.; VISCONTI, P.; VELASCO-HERREJÓN, P.; ZEYRINGER, M.; CAMARGO, L. R. System impacts of wind energy developments: Key research challenges and opportunities. **Joule**, Cell Press, v. 9, p. 101799, 1 2025. ISSN 2542-4351. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2542435124005130>. Acesso em: 11 jun. 2025.

MELO, R. P. de. **Toco ou trucado: qual o melhor?** 2019. Disponível em: <https://guiadotrc.com.br/publicacao/toco-ou-trucado-qual-o-melhor/35174>. Acesso em: 15 jun. 2025.

MOJLISH, S. A. K.; SUTANTO, D.; MUTTAQI, K. M. **Impacts of ultra-fast charging of electric vehicles on power grids**: State-of-the-art technologies, case studies, and a proposed improvement using a solid-state transformer. Amsterdam, Holanda: Elsevier Ltd, 2025.

MOURA JÚNIOR, C. F. F. **Impacto da Tecnologia HCCI no desempenho e Emissões de Gases Poluentes em Veículos Híbridos**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MURPHY, R. What is undermining climate change mitigation? how fossil-fuelled practices challenge low-carbon transitions. **Energy Research and Social Science**, Elsevier Ltd, v. 108, 2024. ISSN 22146296.

MUSA, A.; BASMA, H.; MULHOLLAND, E.; RODRÍGUEZ, F. **CO2 emissions from trucks in the European Union**: An analysis of the 2021 reporting period. Washington, EUA: ICCT, 2024. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2024/12/ID-243-%E2%80%9393-EU-CO2-trucks_final2.pdf. Acesso em: 15 jun. 2025.

MUSCULUS, M. P.; MILES, P. C.; PICKETT, L. M. Conceptual models for partially premixed low-temperature diesel combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier Ltd, v. 39, p. 246–283, 2013. ISSN 03601285.

NIDEC. **E-Axle, Nidec's Traction Motor System (EV Drive Motor System)**. 2025. Disponível em: https://www.nidec.com/en/technology/new_field/e-axle/. Acesso em: 25 jul. 2025.

NOGUEIRA, L. A. H.; SEABRA, J. E. A.; BEST, G.; LEAL, M. R. L. V.; POPPE, M. K. **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: BNDES, 2008. ISBN 978-85-87545-24-4. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/35284/1/6bioetanol-port.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2025.

NORRIS, J.; ESCHER, G.; ENERGY, R. **Heavy Duty Vehicles Technology Potential and Cost Study**. Washington, EUA: ICCT, 2017. Final Report for the International Council on Clean Transportation (ICCT). Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/HDV-Technology-Potential-and-Cost-Study_Ricardo_Consultant-Report_26052017_vF.pdf. Acesso em: 21 jun. 2025.

OE. **Impact of Electric Vehicles on the Grid**. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2024-10/Congressional%20Report%20EV%20Grid%20Impacts.pdf>. Acesso em: 15 jun. 2025.

OTM. **Maiores do Transporte & Melhores do Transporte**. São Paulo (SP): OTM editora, 2023. Disponível em: <https://acervodigitalotm.com.br/magazines/ae3f0c700577238e9f8f41aa34359fcd.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

PETRUSHOV, V. A. Coast down method in time-distance variables. **SAE International**, SAE International, 2 1997.

PLÖTZ, P.; GNANN, T.; JOCHEM, P.; YILMAZ, H. Ü.; KASCHUB, T. Impact of electric trucks powered by overhead lines on the european electricity system and co2 emissions. **Energy Policy**, v. 130, p. 32–40, 7 2019. ISSN 03014215.

RAHIMI, S.; MAZAHARI, K.; ALIPOOR, A.; MOHAMMADPOUR, A. The effect of hydrogen addition on methane-air flame in a stratified swirl burner. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 265, 2 2023. ISSN 03605442.

REALIS. **Ignite**. 2025. Disponível em: <https://www.realis-simulation.com/products/ignite/>. Acesso em: 06 ago. 2025.

RITCHIE, H. Cars, planes, trains: where do co₂ emissions from transport come from? **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>. Acesso em: 15 jun. 2025.

RYME, A. **Euro 7 Truck and Bus Regulation Delayed Until 2029: An EU Agreement**. 2023. Disponível em: <https://www.rymeautomotive.com/en/Euro-7-regulations-delayed-until-2029-in-the-EU/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SANTOS, G. M. Energy in brazil: a historical overview. **Journal of Energy History**, Comité d’histoire de l’électricité et de l’énergie, Fondation groupe EDF, No 1, p. 1g–30g, 2018. Disponível em: <https://stm.cairn.info/journal-of-energy-history-2018-1-page-1g?lang=enhttps://stm.cairn.info/journal-of-energy-history-2018-1-page-1g?lang=en>. Acesso em: 15 ago. 2025.

SCHULZ, C.; SICK, V.; WOLFRUM, J.; DREWES, V.; ZAHN, M.; MALY, R. Quantitative 2d single-shot imaging of no concentrations and temperatures in a transparent si engine. **Symposium (International) on Combustion**, v. 26, p. 2597–2604, 1996. ISSN 00820784.

SICILIANO, B.; SILVA, C. M. da; LOUREIRO, L. N.; VICENTINI, P. C.; ARBILLA, G. Hydrocarbon emissions in flex fuel vehicles using ethanol: Preliminary results using a method implemented in brazil. **Fuel**, Elsevier Ltd, v. 287, 3 2021. ISSN 00162361.

SICILIANO, B.; SILVA, C. M. da; MELO, T. C. de; VICENTINI, P. C.; ARBILLA, G. An analysis of speciated hydrocarbons in hydrous ethanol (h100) and ethanol-gasoline blend (e22) for vehicle exhaust emissions. **Atmospheric Environment**, Elsevier Ltd, v. 285, 9 2022. ISSN 18732844.

SLEDNEV, V.; JOCHEM, P.; FICHTNER, W. Impacts of electric vehicles on the european high and extra high voltage power grid. **Journal of Industrial Ecology**, v. 26, p. 824–837, 6 2022. ISSN 1088-1980.

SOUSA, R. de H. **Modelagem de um veículo elétrico de alcance estendido (REEV) utilizando um motor de ignição por compressão de carga homogênea (HCCI) a etanol**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

SUGIHARA, C.; HARDMAN, S.; KURANI, K. Who decides which trucks to buy? implications for electrifying freight fleets. **Transportation Research Part D:Transport and Environment**, Pergamon, v. 126, p. 104015, 1 2024. ISSN 1361-9209. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920923004121>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TAHA, S. S.; IDOUDI, S.; ALHAMDAN, N.; IBRAHIM, R. H.; SURKATTI, R.; AMHAMED, A.; ALREBEI, O. F. **Comprehensive review of health impacts of the exposure to nitrogen oxides (NOx), carbon dioxide (CO2), and particulate matter (PM)**. Amsterdam, Holanda: Elsevier B.V., 2025.

TAN, J.; CHEN, K.; OUYANG, L.; SUN, D.; LE, C. **China Auto Industry National VI B Emission Standard**. 2023. Disponível em: <https://www.trade.gov/market-intelligence/china-auto-industry-national-vi-b-emission-standard>. Acesso em: 19 jun. 2025.

UCHOA FILHO, F. E. L.; SAMPAIO, H. C. M.; MOURA JÚNIOR, C. Fernandes de F.; OLIVEIRA, M. L. M. de; THÉ, J. V. G.; ROCHA, P. A. C.; BUENO, A. V. Radiation and combustion effects of hydrogen enrichment on biomethane flames. **Processes**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), v. 13, 4 2025. ISSN 22279717.

UNECE. **Proposal for a new Amendment 4 to UN Global technical regulation No. 4: Test procedure for compression ignition (C.I.) engines and positive-ignition (P.I.) engines fuelled with natural gas (NG) or liquefied petroleum gas (LPG) with regard to the emission of pollutants (WHTC)**. Genebra, Suíça: UNECE, 2021. Disponível em: https://unece.org/sites/default/files/2021-06/ECE_TRANS_WP.29_2021_79E.pdf. Acesso em: 09 ago. 2025.

UNEP. **Used Heavy-Duty Vehicles and the Environment: A Global Overview of Used Heavy-Duty Vehicles: Flow, Scale and Regulation**. 2024. Disponível em: <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/44826>. Acesso em: 12 jun. 2025.

VOLVO. **Motor D13K540, EU6SCR**: Folha de Especificações. 2019. Disponível em: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/D13K540,%20EU6SCR_Por_07_310999624.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

VOLVO. **Motor D13K460, EU6SCR**: Folha de Especificações. 2021. Disponível em: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/D13K460,%20EU6SCR_Por_010_313653981.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

VOLVO. **Transmissão AT2612 Caixa automatizada I-Shift**: Folha de Especificações. 2022. Disponível em: https://stpi.it.volvo.com/STPIFiles/Volvo/FactSheet/AT2612_Por_02_324367762.pdf. Acesso em: 25 jul. 2025.

VOLVO. **VOLVO FH 6x4R**: Especificações Técnicas. 2022. Disponível em: <https://www.volvotrucks.com.br/content/dam/volvo-trucks/markets/brazil/truck/fichas-t%C3%A9cnicas-2022-euro6/euro-6-fh-2022/FH-6x4R.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

VOLVO. **VOLVO FH 6x4T (sem redução nos cubos)**: Especificações Técnicas. 2022. Disponível em: <https://www.volvotrucks.com.br/content/dam/volvo-trucks/markets/brazil/truck/fichas-t%C3%A9cnicas-2022-euro6/euro-6-fh-2022/FH-6x4T-SRED-V.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2025.

VRIES, A. de. The growing energy footprint of artificial intelligence. **Joule**, v. 7, p. 2191–2194, 10 2023. ISSN 25424351.

WEISSINGER, F.; LACAVA, P.; PEÑARANDA, A.; MARTELLI, A.; RUFINO, C. H.; CURTO-RISSO, P.; MARTINEZ-BOGGIO, S. Enhancing efficiency of ethanol-powered range extenders in the bmw i3: A simulation-based optimization approach. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 251, 10 2025. ISSN 18790682.

WILLIAMS, M.; MINJARES, R. **A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards**. Washington, EUA: ICCT, 2016. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf. Acesso em: 25 jun. 2025.

XU, Z.; LI, Y.; QIN, Y.; BACH, E. A global assessment of the effects of solar farms on albedo, vegetation, and land surface temperature using remote sensing. **Solar Energy**, Pergamon, v. 268, p. 112198, 1 2024. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X23008320>. Acesso em: 12 jun. 2025.

YANG, L.; HE, H. **China's stage VI emission standard for heavy-duty vehicles (final rule)**. Washington, EUA: ICCT, 2018. Disponível em: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/China_VI_Policy_Update_20180720.pdf. Acesso em: 20 jun. 2025.

YÜKSEL, S.; DINÇER, H.; YAVUZ, D. Effective radioactive waste management strategies in nuclear energy investments for environmental sustainability. *In*: CHATTERJEE, T. **International trade, economic crisis and the sustainable development goals**. Leeds: Emerald Publishing Limited, 2024. cap. 6. p. 87-97. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/978-1-83753-586-620241006>. Acesso em: 10 jun. 2025.

ZHANG, T.; SHOU, L.; CHEN, L.; WANG, H.; LONG, Y.; WANG, Z.; CHEN, J. Detailed and reduced chemical kinetic model of ch4/air mixtures combustion based on high-precision first-principles molecular dynamics simulation. **Chemical Engineering Science**, Elsevier Ltd, v. 281, 11 2023. ISSN 00092509.