



CESE-ETANOL - SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EMBARCADA COM
ETANOL PARA VEÍCULOS PESADOS ELETRIFICADOS: CONCEPÇÃO,
FABRICAÇÃO E ANÁLISE

Gabriel Lassery Rocha da Silva

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Engenharia de Transportes, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Transportes.

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Rio de Janeiro
Setembro de 2024

CESE-ETANOL - SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EMBARCADA COM
ETANOL PARA VEÍCULOS PESADOS ELETRIFICADOS: CONCEPÇÃO,
FABRICAÇÃO E ANÁLISE

Gabriel Lassery Rocha da Silva

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO
ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE
ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES.

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Examinado por:

Prof. Paulo Emílio Valadão de Miranda, D.Sc.

Prof. Glaydston Mattos Ribeiro, D.Sc.

Prof. Carlos Rodrigues Pereira Belchior, D.Sc.

Dr. Edvaldo da Silva Carreira, D.Sc.

Dr. Sami Massalami Mohammed Elmassalami Ayad, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2024

Da Silva, Gabriel Lassery Rocha

CESE-Etanol – Sistema de Geração de Energia Embarcada com Etanol para Veículos Pesados Eletrificado: Concepção, Fabricação e Análise / Gabriel Lassery Rocha da Silva. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XVII, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Transportes, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 114-122.

1. Veículos Híbridos. 2. Emissões. 3. Etanol. 4. Transição Energética I. de Miranda, Paulo Emílio Valadão de Miranda. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Transportes. III. Título.

*A minha mãe, meu finado pai e minha esposa,
por todo o amor, paciência e suporte incondicional.*

Agradecimentos

A conclusão desta tese é fruto de todo o apoio e suporte recebido ao longo de minha trajetória acadêmica.

Meu profundo agradecimento ao meu orientador, professor Paulo Emílio de Miranda, cujos ensinamentos e amizade transcendem o escopo acadêmico, pela oportunidade e incentivo para desenvolver o tema aqui presente.

Sou grato à equipe do Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ pelos ensinamentos e confiança durante este trabalho.

Agradeço à CAPES pelo apoio financeiro, por meio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e ao Instituto de Ciência, Tecnologia e Inovação de Maricá (ICTIM) e a Prefeitura de Maricá pelo apoio financeiro, por meio do projeto PET23679

Um agradecimento especial aos meus amigos, que tornaram o processo mais leve, permitindo-me seguir adiante.

Aos meus pais, Tanya e José, que sempre apoiaram e incentivaram os meus estudos, mesmo diante das dificuldades, minha eterna gratidão.

E, finalmente, à minha esposa, Thaís, por todo amor e paciência durante os altos e baixos dessa trajetória.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, os meus sinceros agradecimentos.

Resumo da tese de doutorado apresentada à Coppe/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CESE-ETANOL - SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA EMBARCADA COM ETANOL PARA VEÍCULOS PESADOS ELETRIFICADOS: CONCEPÇÃO, FABRICAÇÃO E ANÁLISE

Gabriel Lassery Rocha da Silva
Setembro/2024

Orientador: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Programa: Engenharia de Transportes

A mudança climática e a preocupação global com emissões de gases do efeito estufa impulsionam esforços internacionais para mitigar impactos ambientais adversos. No Brasil, o setor rodoviário é um dos principais responsáveis por essas emissões, ressaltando a necessidade de alternativas sustentáveis aos combustíveis fósseis.

Este trabalho estuda o desenvolvimento de sistema proprietário do Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ – o CESE-Etanol, para geração de energia elétrica embarcada em veículos pesados eletrificados. O objetivo principal é investigar a viabilidade ambiental, social e econômica da substituição de ônibus urbanos convencionais a diesel por ônibus híbridos a etanol utilizando tal equipamento.

A análise teórica evidenciou vantagens significativas na substituição tecnológica, incluindo reduções nas emissões de CO₂e, NO_x e material particulado (MP). Em contrapartida, as emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) aumentaram, embora em menores valores absolutos. Testes experimentais indicaram eficiência total do CESE-Etanol em 29,83%, que se traduz em consumo de 13,76 MJ/km, 80% menor do que 17,19 MJ/km referentes ao veículo convencional a diesel. A redução de emissões de CO₂, NO_x e MP foram de 67,8%, 96,2% e 50%, respectivamente, quando comparados com ônibus urbanos a diesel.

Três regimes de operação foram analisados para o ônibus híbrido etanol, com o cenário mais otimista para a análise experimental apresentando aumento de apenas 5% no custo nivelado de dirigir comparado a convencionais a diesel. Percebe-se a viabilidade da nova tecnologia e, para acelerar a vantagem econômica dessas tecnologias e reduzir emissões, se faz importante o desenvolvimento de políticas de incentivo para redução de seus custos de aquisição.

Abstract of doctoral thesis presented to Coppe/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

CESE-ETHANOL – ETHANOL ONBOARD ENERGY GENERATION SYSTEM
FOR ELECTRIFIED HEAVY-DUTY VEHICLES: DESIGN, MANUFACTURE,
AND ANALYSIS

Gabriel Lassery Rocha da Silva
September/2024

Advisor: Paulo Emílio Valadão de Miranda

Department: Transport Engineering

Climate change and global concern over greenhouse gas emissions are driving international efforts to mitigate adverse environmental impacts. In Brazil, the road transport sector is one of the main contributors to these emissions, highlighting the need for sustainable alternatives to fossil fuels.

This work studies the development of a proprietary system from the Hydrogen Laboratory at Coppe/UFRJ – the CESE-Ethanol, for on-board electricity generation in electrified heavy vehicles. The main objective is to investigate the environmental, social, and economic feasibility of replacing conventional diesel urban buses with ethanol hybrid buses using this equipment.

The theoretical analysis highlighted significant advantages in the technological substitution, including reductions in CO₂e, NO_x, and particulate matter (PM) emissions. On the other hand, hydrocarbon (HC) and carbon monoxide (CO) emissions increased, although in lower absolute values. Experimental tests indicated an overall energy efficiency of 29.83% for the CESE-Ethanol, translated to 13.76 MJ/km in the hybrid ethanol bus, compared to 17.19 MJ/km in the conventional diesel bus. The reduction in CO₂, NO_x and PM emissions in the new technology were 67.8%, 96.2% and 50%, respectively, compared to conventional diesel urban buses.

Three operating regimes were analyzed for the ethanol hybrid bus, with the most optimistic scenario for the experimental analysis showing only a 5% increase in the total cost of driving compared to conventional diesel buses. The feasibility of the new technology is evident, and to accelerate the economic advantage of these technologies and reduce emissions, it is important to develop incentive policies to lower their acquisition costs.

Sumário

Agradecimentos	IV
Lista de Figuras.....	X
Lista de Tabelas	XV
Capítulo 1	1
1. Introdução	1
Capítulo 2	3
2. Proposta e Objetivos da Tese.....	3
2.1. Justificativa	3
2.2. Objetivos Geral e Específicos.....	4
Capítulo 3	7
3. Revisão Bibliográfica	7
3.1. Análise Bibliométrica.....	7
3.1.1. Publicações por Autores.....	9
3.1.2. Publicações por Revistas	10
3.1.3. Evolução Anual do Assunto	12
3.2. Análise de Referencial Bibliográfico e de Estado da Arte	13
3.2.1. Motores de Combustão Interna.....	14
3.2.2. Cadeia de suprimento dos principais combustíveis em transportes....	19
3.2.3. Aumento na demanda global por energia.....	22
3.2.4. Mudança climática e emissões em motores de combustão interna.....	27

3.2.5.	Segurança energética e externalidades do diesel no impacto do setor de transportes.....	36
3.2.6.	O sucesso do etanol brasileiro	40
3.2.7.	Veículos híbridos como viabilização tecnológica e climática.....	43
Capítulo 4	.....	50
4.	Metodologia	50
4.1.	Delimitação de Escopos.....	50
4.2.	Concepção do sistema de geração de energia	51
4.3.	Design do CESE-Etanol	52
4.4.	Fabricação do CESE-Etanol	53
4.5.	Elaboração de Experimento.....	59
Capítulo 5	.....	64
5.	Resultados	64
5.1.	Testes do CESE-Etanol em modo estacionário	64
5.1.1.	Teste de Desempenho	64
5.1.2.	Testes de Emissões	67
5.1.3.	Operação em campo.....	72
5.2.	Compilação de Resultados e Tratamento de Dados.....	73
Capítulo 6	.....	77
6.	Discussões.....	77
6.1.	Validação teórica.....	77
6.1.1.	Validação do Aspecto Geral.....	79
6.1.2.	Validação de Aspectos Particulares	84
6.2.	Validação Experimental	103

6.2.1.	Análise de Critérios Técnicos, Ambientais e Sociais	103
6.2.2.	Análise de Viabilidade Econômica.....	107
Capítulo 7	.....	110
7.	Conclusões.....	110
Referências Bibliográficas	.....	114

Lista de Figuras

- Figura 1 – Evolução do número de publicações sobre o tema ao longo dos anos, mantendo-se aproximadamente constante. Fonte: Elaboração Própria 12
- Figura 2 - Representação de um motor de quatro tempos e seus principais componentes. (Fonte da imagem: adaptado e traduzido de (GRANET, BLUESTEIN, 2015))...... 15
- Figura 3 – Etapas de funcionamento do motor de combustão interna de quatro tempos. (Fonte: Traduzido de GRANET, BLUESTEIN, 2015)..... 16
- Figura 4 – Etapas de funcionamento do motor de combustão interna de quatro tempos. (Fonte: Traduzido de GRANET, BLUESTEIN, 2015)..... 18
- Figura 5 – Processos e emissões diretas e indiretas para os principais combustíveis em transportes (Fonte: Elaboração própria)..... 22
- Figura 6 - Crescimento na demanda de energia mundial e projeções até 2040. Percebe-se que entre 1940 e 2040, a quantidade consumida de energia anualmente pode aumentar em mais de 11 vezes (traduzido de DE MIRANDA, Paulo Emilio V., 2019)..... 22
- Figura 7 – Relação entre consumo energético de eletricidade *per capita* e PIB de diversos países. Percebe-se a relação direta entre desenvolvimento e consumo energético, no sentido que países desenvolvidos consomem notoriamente mais energia *per capita* do que países subdesenvolvidos. (Fonte da imagem: traduzido de MOSS, KINCER, 2023) 23

Figura 8 – Histórico e projeção de crescimento da população urbana (Fonte da imagem: Traduzido de RODRIGUE, 2020). Percebe-se uma tendência de crescimento quase linear a partir da década de 1980.....	25
Figura 9 – Consumo energético per capita em 1982 e 2022. (Fonte da Imagem: Adaptado e traduzido de OUR WORLD IN DATA, 2023). No intervalo, regiões com maiores níveis de urbanização também apresentam maiores taxas de crescimento de consumo energético.	26
Figura 10 - Concentração de CO ₂ na atmosfera e temperatura média global. (Traduzido e adaptado de SALAWITCH, CANTY, <i>et al.</i> , 2017). Percebe-se que desde o início do antropoceno, ambas aumentam na mesma proporção.....	28
Figura 11 –Variação da concentração de CO ₂ na atmosfera desde 1958 até os dias de hoje. Percebe-se tendência de aumento praticamente linear. (Fonte da imagem: Traduzido de US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA, 2024).....	29
Figura 12 – Conversor catalítico de três caminhos típico para a equação de combustão completa. (Fonte da Imagem: Adaptado de KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, <i>et al.</i> , 2021) Nos casos da combustão real, nos gases de escape também são encontradas espécies químicas não reagidas, como HC, CO e NO _x	34
Figura 13 - Relação entre o MP presente no ar e a mortalidade a cada 100.000 habitantes nas principais cidades europeias. (DE MIRANDA, P.E.V., 2013)	35
Figura 14 - Emissões de CO ₂ e do setor que consome energia no Brasil para o ano de 2022. Percebe-se a magnitude de emissões do setor de transportes, incontestavelmente em	

primeiro lugar, com 49,7% das emissões para esse setor. (Fonte da imagem: adaptado de EPE, 2023).....	37
Figura 15 – Participação do diesel e da gasolina nas fontes energéticas para o setor de transportes. (Fonte da Figura: Adaptado de EPE, 2023). Percebe-se que ambos, gasolina e diesel, somados, perfazem mais de 61% do total de energia consumida em transportes no Brasil.	38
Figura 16 – Evolução do déficit brasileiro na produção de diesel e gasolina, que mostra tendências de crescimento desde 2005. (Elaboração própria com dados de ANP, 2024)	39
Figura 17 – Produção anual de autoveículos segregada por tipo de combustível (elaboração própria com dados de ANFAVEA, 2023). Percebe-se pelo gráfico o período de atividade do Proálcool, quando o licenciamento de veículos puramente a etanol ultrapassou o licenciamento de veículos puramente a gasolina, e também o advento do veículo <i>flex-fuel</i> em 2003, hoje maioria absoluta de licenciamentos.....	43
Figura 18 – Progressão no estoque de automóveis elétricos e híbridos. Percebe-se que grande parte da fatia de mercado para ambas as tecnologias está na China, mais da metade do total. (Fonte da image: traduzido de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023b).	46
Figura 19 – Licenciamento de veículos elétricos no Brasil. Percebe-se crescimento expressivo. Elaboração própria com dados de ANFAVEA, 2023.....	48
Figura 20 – Projeto de arranjo do CESE-Etanol com os principais componentes.	56

Figura 21 – Renderização do sistema CESE-Etanol em vista em perspectiva, em modo estacionário.....	58
Figura 22 - Renderização do sistema CESE-Etanol em vista em perspectiva, em modo embarcado	58
Figura 23 – Registro fotográfico do CESE-Etanol fabricado em modo estacionário (Fonte: Elaboração própria).....	59
Figura 24 – Aparato experimental para realização de testes de desempenho e emissões CESE-Etanol (Fonte: Elaboração própria).....	61
Figura 25 – Fotografia da montagem do aparato experimental para medições no CESE-Etanol em modo estacionário (Fonte: Elaboração própria).....	62
Figura 26 – Ônibus Híbrido Elétrico Hidrogênio sendo recarregado pelo CESE-Etanol em um teste de campo. (Fonte da Imagem: Adaptado de COPPETEC, 2018)	73
Figura 27 – Comparação entre consumos específicos e eficiências nos quatro pontos de operação, 25%, 50%, 75% e 100%.....	74
Figura 28 – Consolidado de emissões experimentais pré-catalisador para CO ₂ , CO e HC, nos quatro pontos de operação, 25%, 50%, 75% e 100%.	75
Figura 29 – Distribuição de emissões poço-ao-tanque e tanque-à-roda de alguns dos principais combustíveis utilizados no setor de transportes no Brasil. (Fonte da imagem: ESTEVES, DA COSTA, <i>et al.</i> , 2022)	81
Figura 30 – Comparativo de Autonomia do ônibus híbrido elétrico-etanol por análise teórica de acordo com regime de operação e consumo.....	94

Figura 31 – Evolução do custo do diesel tipo B S10 em distribuidoras no Rio de Janeiro. (Fonte: Elaboração própria com dados de ANP, 2024)	98
Figura 32 - Evolução do custo do etano hidratado em distribuidoras no Rio de Janeiro. (Fonte: Elaboração própria com dados de ANP, 2024)	99
Figura 33 - Comparativo de Autonomia do ônibus híbrido elétrico-etanol por análise com dados experimentais de operação do CESE-Etanol, de acordo com regime de operação e consumo.	103
Figura 34 – Comparativo de autonomia entre ônibus híbrido elétrico-etanol com dados teóricos e com dados experimentais do CESE-Etanol em modo bancada, extrapolados para o veículo.....	104

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Indexações por conjunto de palavras-chave na base Web of Science. Fonte: Elaboração Própria.....	8
Tabela 2 – Número de publicações sobre o tema por autor. Fonte: Elaboração Própria ..	9
Tabela 3 – Número de publicações sobre o tema, por revista. Fonte: Elaboração Própria	10
Tabela 4 – Consumo final por fonte de energia no Brasil em 2021 e 2022. Adaptado de (EPE, 2023).	38
Tabela 5 – Especificações do Analisador de Gases Alfatest Discovery G4	60
Tabela 6 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 25% de carga.....	66
Tabela 7 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 50% de carga.....	66
Tabela 8 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 75% de carga.....	66
Tabela 9 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 100% de carga.....	67
Tabela 10 – Massas molares dos compostos presentes no escapamento.	70
Tabela 11 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 25% de carga.	70
Tabela 12 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 50% de carga.	71
Tabela 13 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 75% de carga.	71
Tabela 14 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 100% de carga.	72
Tabela 15 – Melhores condições de operação para economia de combustível e redução de emissões com emissões pré-catalisador, referentes ao CESE-Etanol operando em modo estacionário com 75% de carga.....	74

Tabela 16 – Poder calorífico inferior e densidade dos combustíveis padrão, de acordo com a referência, e das misturas utilizadas. Fonte: Elaboração própria com dados de (EPE, 2022).	83
Tabela 17 – Consolidado de Emissões Diretas, Indiretas e Totais para diversos combustíveis. (Fontes: adaptado de ESTEVES, DA COSTA, <i>et al.</i> , 2022, Figura 29 e Tabela 16).....	83
Tabela 18 – Comparação do nível de emissões por quilometro entre diesel, gasolina tipo C e etanol hidratado. (Fonte: Elaborado e adaptado com base em CETESB, 2022). Os valores não podem ser comparados entre si.	86
Tabela 19 – Comparação do nível de emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos por energia disponível no combustível na entrada do motor para diesel tipo B, gasolina tipo C e etanol hidratado. As emissões para CO ₂ e são o somatório de emissões diretas e indiretas, enquanto para os outros poluentes os valores representam emissões diretas. (Fonte: elaboração própria, com dados de CETESB, 2022 e ESTEVES, DA COSTA, <i>et al.</i> , 2022).	88
Tabela 20 – Comparativo de emissões entre ônibus urbanos convencionais a diesel tipo B e ônibus urbanos híbrido elétrico-etanol hidratado (Fonte: elaboração própria, com dados de CETESB, 2022 e ESTEVES, DA COSTA, <i>et al.</i> , 2022)	89
Tabela 21 - Comparativo entre as metodologias LCOD e TCO para análise de custos entre as duas tecnologias, ônibus urbano convencional a diesel e ônibus urbano híbrido elétrico-etanol. A análise TCO é significativa quando o objeto da comparação são dois trens de força diferentes. (Fonte: Traduzido de 21ST CENTURY TRUCK PARTNERSHIP, 2023).....	95
Tabela 22 – Composição do custo do kWh com impostos e taxas de demanda, distribuição e geração para o caso específico da Light S.A em julho de 2024 (Fonte: adaptado para o caso específico com base em LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A, 2024).....	100
Tabela 23 – Regime de operação e custos por km com etanol e energia elétrica na operação de um ônibus híbrido elétrico-etanol – análise teórica.....	100
Tabela 24 – Comparativo de custos entre as duas tecnologias, ônibus urbano convencional operando com diesel e ônibus elétrico-etanol utilizando a metodologia LCOD (Fonte: Elaboração própria).	101
Tabela 25 – Consumo específico e emissões medidas em pré-catalisador e estimadas para pós-catalisador, referentes a conjunto do CESE-Etanol operando em modo estacionário com 75% de carga em ônibus.	105
Tabela 26 – Comparação entre consumo e emissões específicas [g/km] estimada por análise experimental com CESE-Etanol para ônibus híbrido elétrico-etanol e por análise teórica para ônibus híbrido elétrico-etanol e ônibus convencional a diesel.	105

Tabela 27 – Custos com etanol e energia elétrica na operação diária de 300 km de autonomia para o ônibus híbrido elétrico-etanol 108

Tabela 28 – Comparativo de custos, utilizando a metodologia LCOD, entre as três tecnologias, ônibus urbano convencional operando com diesel tipo B em análise teórica, ônibus elétrico-etanol em análise teórica e ônibus elétrico-etanol utilizando CESE-Etanol, em estimativa experimental a partir de medições do CESE-Etanol 108

Capítulo 1

1. Introdução

A mudança climática e a preocupação global com as emissões de gases do efeito estufa têm impulsionado esforços internacionais, como o Acordo de Paris, para mitigar os impactos ambientais adversos. No Brasil, o setor rodoviário é um dos principais contribuintes para essas emissões, destacando a necessidade de alternativas mais sustentáveis aos combustíveis fósseis.

Apesar da vasta experiência brasileira na produção de etanol, a maioria dos veículos pesados que circulam nas ruas ainda é movida a diesel. Esta predominância reflete uma lacuna significativa na adoção de combustíveis alternativos no setor de transporte pesado. A crescente demanda por eletrificação de veículos no cenário global apresenta uma oportunidade única para a substituição da frota convencional por modelos com menores emissões.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de geração de energia elétrica alimentado a etanol para uso como extensor de autonomia em veículos pesados eletrificados. A substituição de ônibus urbanos convencionais a diesel por ônibus híbridos a etanol é investigada quanto à sua viabilidade ambiental, social e econômica. Por meio

de uma pesquisa bibliométrica e uma revisão bibliográfica detalhada, destaca-se a importância do etanol no contexto brasileiro e são identificadas oportunidades para a descarbonização do setor de transportes.

É conduzida uma análise teórica a fim de evidenciar vantagens significativas na substituição tecnológica, incluindo reduções nas emissões, e viabilidade tecnológica e econômica da substituição. Em seguida, são evidenciadas etapas do desenvolvimento experimental do protótipo para, por fim, serem realizados testes experimentais, com expectativa de obter resultados análogos aos alcançados no estudo teórico.

Capítulo 2

2. Proposta e Objetivos da Tese

2.1. Justificativa

As emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis no setor de transportes, em especial o diesel, aliadas à dependência brasileira da importação desse combustível, trazem consigo problemas como elevada pegada de carbono na mobilidade e insegurança energética. Uma possível solução com zero emissões no uso, seria a utilização de veículos pesados totalmente elétricos. Contudo, devido à baixa densidade energética das tecnologias de baterias existentes e da falta de infraestrutura para recarregando rápido até a data desse estudo, uma solução com veículos totalmente elétricos em frotas com alta demanda energética, como veículos pesados, ainda não é comercialmente e tecnologicamente viável em todos os casos. Assim, espera-se que a utilização do etanol em um extensor de autonomia para veículos pesados eletrificados possa permitir o avanço dessas tecnologias em mobilidade pesada no Brasil, reduzir os níveis de emissões no setor de transportes, aumentar a eficiência energética e aumentar a segurança energética brasileira.

Essa tese foi realizada no âmbito do Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ e com financiamento parcial do Projeto PET23679, firmado entre Instituto de Ciência,

Tecnologia e Inovação de Maricá (ICTIM) e a Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com interveniência da Fundação Coppetec e realizado pelo Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ.

O Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ trabalha, desde 1984, com o desenvolvimento de tecnologias em hidrogênio e em eficiência energética. Suas linhas de pesquisa são pilhas a combustível de óxido sólido, hidrogênio natural e veículos sustentáveis, na qual essa tese se encaixa. O sistema de extensão de autonomia mencionado nessa tese, denominado CESE-Etanol, foi desenvolvido em projetos do Laboratório de Hidrogênio e é objeto da patente “SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ALIMENTADO A ETANOL PARA USO ESTACIONÁRIO OU EXTENSÃO DE AUTONOMIA EM VEÍCULOS PESADOS ELETRIFICADOS E MÉTODO DE CONTROLE INTELIGENTE”, número BR1020190209739 (INPI, 2019).

2.2. Objetivos Geral e Específicos

O objetivo do presente trabalho é preencher a lacuna identificada no conhecimento científico com o projeto, desenvolvimento, fabricação e testes de um sistema de geração de energia elétrica embarcado, alimentado a etanol, para utilização em veículos pesados eletrificados, especificamente ônibus urbanos do tipo padron, visando redução de gases do efeito estufa, aumento da eficiência energética, aumento de segurança energética para o Brasil e redução de poluentes atmosféricos. A aplicação desse sistema aproveita-se também da experiência tecnológica consolidada e da posição favorável que o Brasil se encontra na produção e utilização de etanol combustível, fomentando empregos e desenvolvendo o mercado nacional.

Para tal, foram estabelecidos três objetivos específicos para desenvolvimento do conhecimento e contribuição dessa pesquisa. São eles:

- Demonstrar a lacuna no conhecimento a ser preenchida, através da apresentação do estado da arte em temas que margeiam o objetivo geral, como emissões em transportes, desenvolvimento e uso do etanol no Brasil e veículos elétricos híbridos;
- Mostrar a viabilidade tecnológica da utilização de um extensor de autonomia composto por motor de ciclo Otto, convertido para utilização com etanol, em conjunto com motor elétrico operando como gerador para geração embarcada de energia elétrica, através do projeto, fabricação e testes de operação de tal sistema;
- Demonstrar os benefícios climáticos da substituição de diesel pelo etanol, utilizando as emissões experimentais em modo estacionário de tal sistema comparadas com às da literatura;
- Comparar os aspectos econômicos da substituição de um ônibus urbano convencional, a diesel, por um ônibus urbano híbrido, com etanol como fonte de energia embarcada.

Dessa forma, essa tese é dividida, a seguir, em:

- Revisão Bibliográfica – onde são apresentados os principais temas relacionados ao tema da tese e onde é apresentada a oportunidade para o desenvolvimento do sistema aqui proposto;
- Metodologia – onde são apresentados os procedimentos para fabricação do sistema aqui proposto, o CESE-Etanol, e as etapas de sua fabricação e testes;

- Resultados – onde são apresentados os resultados dos testes experimentais com o CESE-Etanol;
- Discussões – onde é traçado um paralelo entre os resultados experimentais obtidos e os resultados encontrados através de análise teórica da literatura; e
- Trabalhos Futuros – onde são apresentados possíveis desenvolvimentos adicionais ao apresentado na tese;
- Conclusão.

Capítulo 3

3. Revisão Bibliográfica

O processo de Revisão Bibliográfica compreende a análise bibliométrica do tema e da análise do referencial bibliográfico e do estado da arte. A análise bibliométrica visa apresentar a evolução na taxa de publicação, a relevância das palavras-chave, dos autores e as revistas que mais publicam sobre o assunto. Através da análise do referencial bibliográfico é possível perceber como os diversos assuntos margeiam o tema e identificar a lacuna no conhecimento que o desenvolvimento do sistema proposto nessa tese visa preencher.

3.1. Análise Bibliométrica

Como ponto de partida para o estudo em questão, foi realizada uma revisão bibliométrica a fim de perceber a evolução do assunto através do número de publicações a ele relacionadas e observar a sua linha de tendência. Em seguida, a partir da revisão bibliométrica, foi possível realizar uma revisão bibliográfica com intuito de compreender o estado da arte e identificar lacunas no conhecimento que tal estudo visa preencher.

Para o levantamento da revisão bibliométrica, foram feitas pesquisas na base Web of Science com as seguintes combinações de palavras-chave: Electric Vehicle, Ethanol,

Hybrid Vehicle, Electrification, Transportation e Emissions, dentre artigos e artigos de revisão.

A Tabela 1 apresenta o resultado de indexações da pesquisa para cada um dos conjuntos selecionados de palavras-chave e operadores booleanos, desde janeiro de 2010 até dezembro de 2023. O mês e ano de janeiro de 2010 foram escolhidos, pois, foram os mesmos utilizados para o exame de qualificação dessa tese. Dessa forma, é possível realizar um paralelo entre os dois trabalhos e destacar o quantitativo de publicações realizado nesse ínterim. Assim, foram encontradas 2025 entradas totais, das quais 1652 são distintas, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Indexações por conjunto de palavras-chave na base Web of Science. Fonte:

Elaboração Própria

Conjunto de Palavras-Chave					Indexações
Electric Vehicle	AND	Ethanol			311
Energy Security	AND	Ethanol			704
Hybrid Vehicle	AND	Ethanol			164
Electrification	AND	Ethanol	AND	Transportation	18
Hybrid Vehicle	AND	Ethanol	AND	Emissions	100
Transportation	AND	Ethanol	AND	Emissions	728
TOTAL					2025 (1649 distintas)

Apenas como um primeiro critério de aproximação - ainda em alto nível - sobre à evolução do assunto: no exame de qualificação para essa tese, com referências de julho de 2021, havia 1702 entradas, das quais 1437 eram distintas. A atualização dos números para dezembro de 2023 mostra um aumento de 19% no número de publicações em 30

meses, considerando todos os conjuntos de palavras-chave, ou ainda um aumento de 15% no número de publicações distintas entre si para o mesmo período.

Para um horizonte de eventos de 167 meses a que se propõe a bibliometria, de janeiro de 2010 até dezembro de 2023, o último período de 30 meses representa 13% do total de publicações, porém com aumento no número de publicações distintas de 15%. Tal fato aponta, preliminarmente, não só para a manutenção do assunto na literatura, como para um aumento na sua relevância. De maneira semelhante, o aumento mais intenso no número de publicações gerais, não desconsiderar as publicações repetidas (19% contra 15%), sugere congruência para o conjunto de palavras-chave escolhidas e um aumento de foco do estado da arte no sentido do tema aqui proposto.

3.1.1. Publicações por Autores

Dentre as indexações sem duplicatas, foram encontrados 5926 autores diferentes. Os 20 autores com maior número de publicações são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Número de publicações sobre o tema por autor. Fonte: Elaboração Própria

Autor	Publicações
Liu, FS	12
Sjöberg, M	11
Karavalakis, G	11
Wu, H	11
Agarwal, AK	10
Dincer, I	10
Durbin, TD	10
Hansen, N	10
Wang, Y	10
Agelin-Chaab, M	9

Asa-Awuku, A	9
Seyam, S	9
Yang, Y	9
Cai, H	8
Han, J	8
Khanna, M	8
Lee, TH	8
Szklo, A	8
Adelung, R	7
Dunn, JB	7
TOTAL	184

Dentre os selecionados, a média de publicações do quartil de autores que mais realiza publicações é de 11 documentos, enquanto a dos que menos realiza publicações é de 7,6 documentos, uma diferença de 44,7%. Isso mostra grande atividade em publicação sobre o tema para os 5 primeiros autores da lista. O número de publicações entre os vinte autores representa somente 11% do total de publicações indexadas, o que aponta que, no caso geral, as publicações são bastante pulverizadas entre os autores.

3.1.2. Publicações por Revistas

Foram identificadas 517 entradas diferentes dentre as editoras das indexações. As 20 com maior número de publicações são mostradas na Tabela 3.

Tabela 3 – Número de publicações sobre o tema, por revista. Fonte: Elaboração Própria

Journal	Publicações
Renewable & Sustainable Energy Reviews	72

Fuel	69
Applied Energy	54
Journal Of Cleaner Production	50
Energy Policy	49
Biomass & Bioenergy	44
Environmental Science & Technology	42
Energy	35
Energies	32
Biofuels Bioproducts & Biorefining-Biofpr	30
Sustainability	23
Renewable Energy	22
International Journal Of Hydrogen Energy	21
Global Change Biology Bioenergy	20
Bioresource Technology	17
Energy & Fuels	17
Energy Conversion And Management	17
Environmental Research Letters	15
International Journal Of Life Cycle Assessment	14
Biotechnology For Biofuels	11
TOTAL	709

Percebe-se que, dentre as editoras, o assunto é bastante concentrado, com as dez que mais publicam retendo aproximadamente 31,4% do total, enquanto as 20 que mais publicam retêm 43% das indexações. Outro fato marcante é que, das 20 editoras apresentadas na Tabela 3, apenas duas não estavam presentes na mesma análise realizada

com indexações até julho de 2021, o que mostra a consolidação de tais plataformas como as mais relevantes para o tema.

3.1.3. Evolução Anual do Assunto

Também foi realizada a análise da evolução de publicações sobre o assunto ao longo do tempo. No gráfico da Figura 1 é mostrada essa evolução.

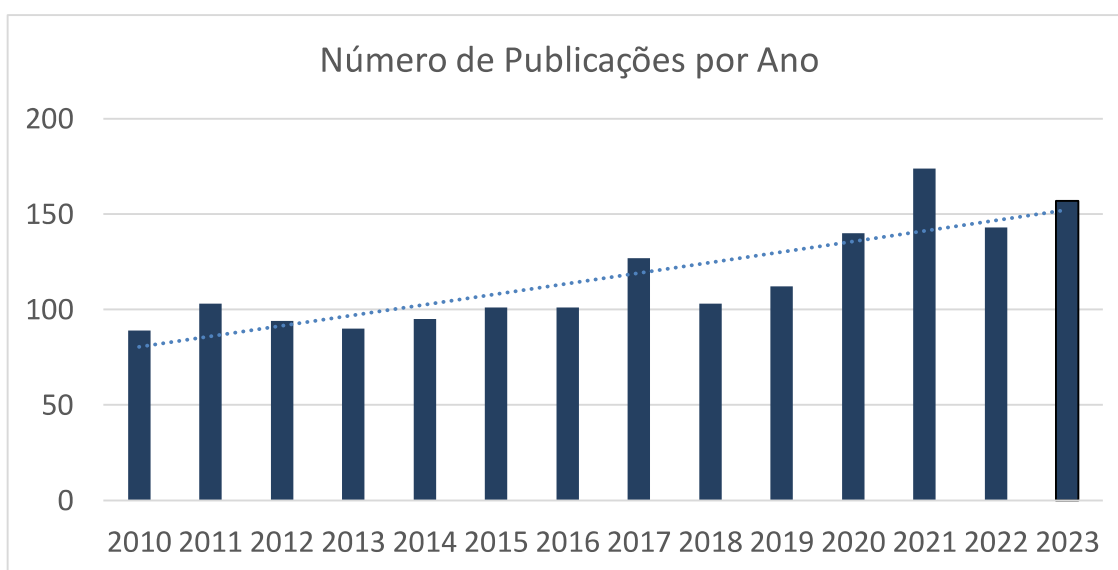


Figura 1 – Evolução do número de publicações sobre o tema ao longo dos anos, mantendo-se aproximadamente constante. Fonte: Elaboração Própria

Percebe-se que o tema é relevante, mantendo uma taxa de publicação constante de pelo menos 100 artigos anuais, com tendências de crescimento, tendo alcançado 173 publicações em 2021.

Diante disso, serão abordados a seguir o estado da arte dos principais pontos, levantados pela bibliografia, que compõem o objetivo da tese.

3.2. Análise de Referencial Bibliográfico e de Estado da Arte

A revisão bibliográfica do estado da arte na elaboração dessa tese foi um processo interativo, que teve início antes desse curso de doutorado e se estendeu por todo o período compreendido pelo curso. Apesar do trabalho aqui desenvolvido ser muito específico, o escopo ao qual ele se insere é bastante abrangente. Dessa forma, o estado da arte e o referencial bibliográfico foram analisados a fim de identificar a lacuna no conhecimento a ser preenchida por meio desse desenvolvimento e explicar a problemática que ele se propõe a resolver, nos aspectos ambientais, sociais, econômicos, tecnológicos e de reindustrialização do país, conforme se segue. Ela foi limitada a pesquisar temas que margeiam o assunto e analisar a evolução de suas publicações, uma vez que não foram encontrados na literatura desenvolvimentos específicos com objetivo equivalente ao dessa tese .

A revisão bibliográfica tem como objetivo mostrar o panorama das emissões de gases do efeito estufa no modo rodoviário no Brasil e o estado da arte de veículos elétricos e híbridos e da utilização de etanol combustível no país. Foram pesquisados os principais gases emitidos na queima de combustíveis em MCI e suas influências, a relevância do diesel para a economia e segurança energética no Brasil e suas externalidades, o etanol combustível como representante de desenvolvido nacional bem-sucedido e seus benefícios ambientais e a evolução na adoção de veículos eletrificados, em especial híbridos. Dessa forma, foi possível observar a magnitude que um desenvolvimento de veículo pesado híbrido elétrico-etanol representaria para redução de emissões e para aumento da segurança energética no país e, a partir daí, entender a lacuna no

conhecimento e propor a utilização de motores ciclo Otto, operando com etanol, como extensor de autonomia em veículos eletrificados.

3.2.1. Motores de Combustão Interna

O desenvolvimento da humanidade é marcado por sua grande capacidade de inventar e adquirir novos conhecimentos. Dentro do escopo do desenvolvimento de máquinas, em especial motores, destacam-se dois importantes marcos históricos que provocaram importantes transformações econômicas, sociais, e tecnológicas para o homem: As Primeira e Segunda Revoluções Industriais.

A Primeira Revolução industrial ocorreu na Inglaterra na metade do século XVIII e início do século XIX, momento em que muitos avanços tecnológicos transformaram os processos de produção industrial. Dentre eles, ressalta-se a invenção da máquina a vapor pelo cientista James Watt em 1765 (NATIONAL GEOGRAPHIC PORTUGAL, 2022). A máquina a vapor foi de grande importância para o fomento da automatização da produção em diversos setores industriais como por exemplo, o de transporte. Locomotivas e navios a vapor foram utilizados para expansão do comércio entre países e por conseguinte maior integração econômica. As máquinas a vapor tinham como princípio fundamental a conversão da energia liberada pelo vapor gerado nas caldeiras em um movimento mecânico dos pistões que poderiam ser conectados a mecanismos dos veículos, permitindo que se locomovessem (TAVARES, 2008).

Por outro lado, já na Segunda Revolução Industrial, que ocorreu no final do século XIX e início do século XX, no que diz respeito ao setor de transportes, tinha-se uma crescente necessidade de melhorar eficiência e porte das máquinas a vapor, em vista de torná-las mais compactas, possibilitando sua aplicação em outros tipos atividades (TAVARES, 2008).

No ano de 1860, como um dos percussores dos motores a combustão interna, Jean Joseph Étienne Lenoir, patenteou um motor de dois tempos, que funcionava com gás de carvão (TRANSPORTATION HISTORY, 2020).

No ano de 1876, Nikolaus August Otto, inventou e patenteou seu motor de combustão interna de quatro tempos, que viria a ser conhecido como ciclo Otto (RAȚIU, 2003). Antes de se compreender como ele funciona, faz-se necessário esclarecer como ele foi construído. Portanto, a Figura 2 **Error! Reference source not found.** foi adicionada para representar um de seus cilindros e ilustrar seus principais componentes.

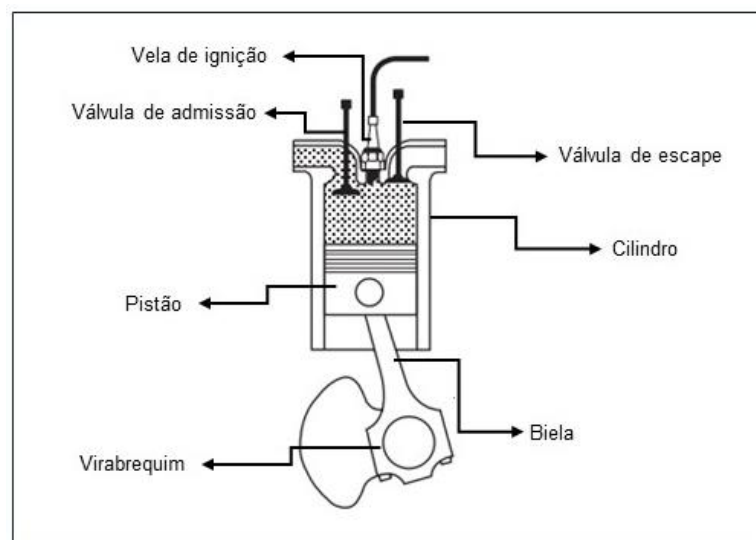


Figura 2 - Representação de um motor de quatro tempos e seus principais componentes.

(Fonte da imagem: adaptado e traduzido de (GRANET, BLUESTEIN, 2015).

Conforme a Figura 2, os principais componentes de um motor de quatro tempos são: cilindro, pistão, biela, virabrequim, válvula de admissão, válvula de escape e vela de ignição. O cilindro é componente estrutural onde, em seu interior, ocorre a combustão. O pistão é um componente móvel pois, através de seu movimento linear, a energia da explosão do combustível é transferida para o eixo do motor. A ele está acoplada a biela, haste responsável por fazer a conexão entre o pistão e o eixo do motor, o virabrequim. O

virabrequim, devido a sua geometria, transforma os movimentos do pistão em movimentos rotativos. Já na parte superior da Figura 2, percebe-se a vela de ignição (componente presente em motores de quatro tempos que operam em ciclo Otto), que tem o papel de gerar a centelha para a combustão da mistura, e as válvulas de admissão e de escape. As de admissão servem para controlar a entrada da mistura de ar e combustível no cilindro, já as de escape servem para liberar a saída dos gases gerados pela combustão.

Granet e Bluestein (2014) também demonstraram (

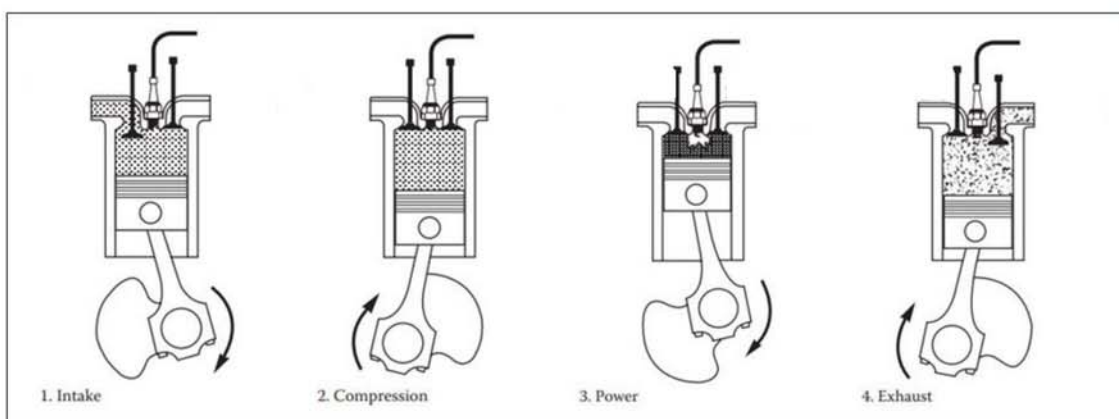


Figura 3), as etapas de funcionamento do motor de quatro tempos: admissão, compressão, expansão e escape.

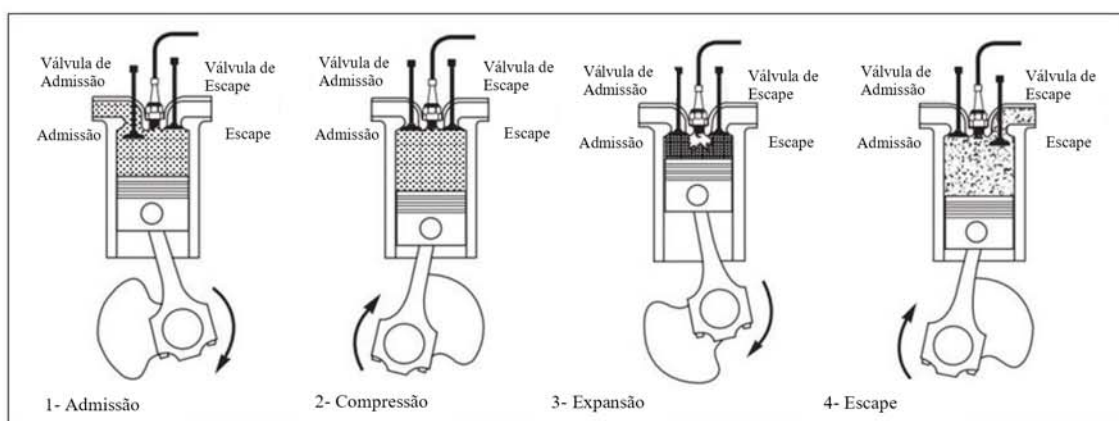


Figura 3 – Etapas de funcionamento do motor de combustão interna de quatro tempos.

(Fonte: Traduzido de GRANET, BLUESTEIN, 2015).

O ciclo se inicia com o pistão no seu Ponto Morto Superior (PMS). No tempo de admissão observado na

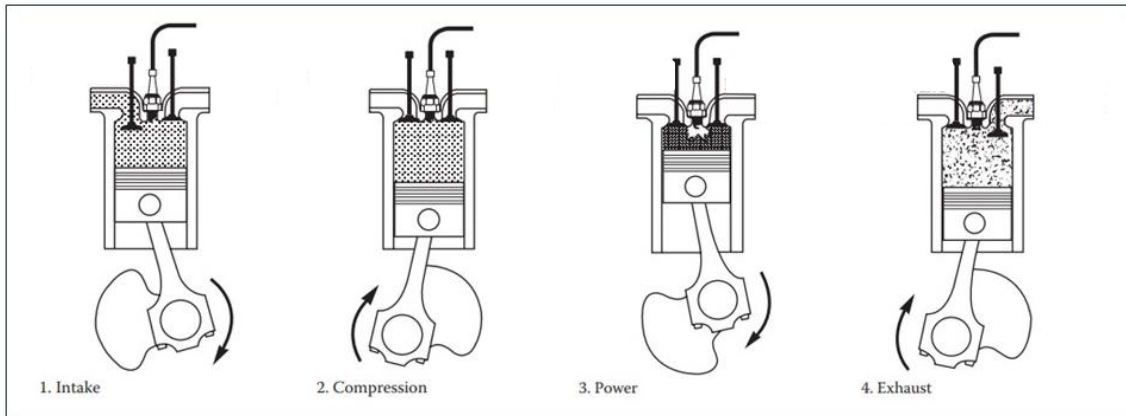


Figura 3, o pistão desce do seu PMS possibilitando a abertura da válvula de admissão e a criação de um vácuo, que suga a mistura de ar e combustível para dentro do cilindro. Na sequência, ocorre o tempo de compressão quando ao final da etapa anterior o pistão encontra-se no seu Ponto Morto Inferior (PMI) em que a válvula de admissão se fecha e o pistão se move para cima comprimindo a mistura e aumentando assim, sua temperatura e pressão. Próximo de quando o pistão atinge novamente seu PMS, ponto em que a mistura atinge seu nível máximo de compressão, a vela de ignição é acionada para gerar uma faísca provocando sua combustão (terceiro tempo) e a produção de trabalho no eixo do motor através do movimento vertical do pistão no cilindro até o PMI. Em seguida, a válvula de escape se abre para que os gases produzidos sejam expulsos por meio da subida do pistão até o PMS e um novo ciclo possa ocorrer.

O processo descrito acima foi batizado como ciclo Otto¹, por se tratar de uma obra desenvolvida por Nikolaus August Otto. Neste ciclo um parâmetro relevante é a octanagem, ou número de octanas, caracterizada pela capacidade de um combustível resistir à combustão espontânea em um ambiente de condições de altas temperatura e pressão. A seleção de condições corretas para a combustão, incluindo o número de octanas do combustível é importante pois assegura que a mistura ar-combustível só

¹ Embora o ciclo Otto opere um motor de quatro tempos, nem todo motor de quatro tempos opera por meio de um ciclo Otto.

entrará em combustão no momento da centelha, e não espontaneamente. Destacam-se como principais vantagens do motor quatro tempos em ciclo Otto em relação aos outros motores: mais leve, mais eficiente, mais versátil e menos poluente (SALOMÃO, OLIVEIRA JUNIOR, *et al.*, 2018).

Seguindo o contexto histórico do desenvolvimento de motores, em 1892, Rudolf Christian Karl Diesel, patenteou o motor ciclo Diesel (WITTMANN, 1994). De maneira similar ao ciclo Otto, o motor ciclo Diesel, também funciona em quatro estágios. Granet e Bluestein (2014) (GRANET, BLUESTEIN, 2015) também abordam seu funcionamento conforme Figura 4.

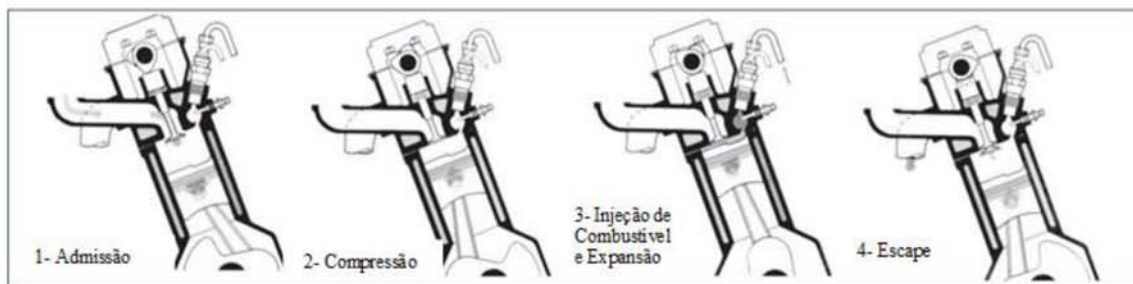


Figura 4 – Etapas de funcionamento do motor de combustão interna de quatro tempos.

(Fonte: Traduzido de GRANET, BLUESTEIN, 2015).

Ao se analisar a Figura 4, é possível perceber que nela também estão presentes as etapas de: admissão, compressão, expansão e escape. Contudo, na etapa de admissão, não é permitida a entrada de uma mistura de ar e combustível, e sim, apenas de ar conforme o pistão desce do PMS até o PMI, na etapa 1. Portanto, somente ar ele é comprimido, ao máximo possível à medida que o pistão sobe na etapa 2, aumentando assim expressivamente, sua temperatura. Quando esta condição é satisfeita, o combustível é injetado e, neste momento ocorre a combustão, sendo o ar extremamente quente que já estava ali, o responsável por provocar a ignição do combustível. Dessa forma, os gases

formados nessa etapa se expandem empurrando o pistão para baixo acionando o virabrequim do motor, na etapa 3. Em seguida o pistão sobe do PMI para o PMS na etapa 4.

Diante disso, de forma semelhante, ao motor do ciclo Otto, aqui o fator combustível também é imprescindível para o processo de combustão. No entanto, o parâmetro utilizado é o índice de cetano, que quantifica a facilidade e velocidade com que um combustível se inflama quando submetido a altas temperaturas.

Existem outros ciclos² em que motores de quatro tempo podem operar e que possuem relevância para o desenvolvimento do tema, mas que fogem ao objeto de estudo desta tese e por este motivo não serão amplamente discutidos.

3.2.2. Cadeia de suprimento dos principais combustíveis em transportes

A análise da cadeia de suprimentos dos principais combustíveis em transportes compreende diversos processos, dentre eles extração da matéria-prima, processamento, produção, transporte, diferentes usos e tratamento final. Uma abordagem completa dos impactos no ciclo de vida de combustíveis pode ser realizada através da aplicação de normas ISO, como por exemplo ISO 14040:2006 (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, 2006). Esta abordagem completa é considerada uma abordagem do tipo do berço ao túmulo (*cradle-to-grave*) (INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION, 2006). Para o escopo desta tese, as cadeias de suprimento dos combustíveis serão discutidas numa abordagem do tipo do poço ao tanque (*well-to-tank*) (SILVA, GONÇALVES, *et al.*, 2006), ou seja, são emissões indiretas, (não relacionadas com a atividade principal da

² Exemplos: Ciclo Stirling, ciclo Miller e ciclo Atkins.

análise, que é a queima do combustível em um MCI (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2024)) compreendendo todos os processos desde extração de matéria prima até a distribuição do combustível para uso final, para os seguintes combustíveis: gasolina, etanol, diesel e biodiesel. Na sessão de análises teóricas de emissões, serão discutidas as emissões na abordagem do tanque à roda (emissões diretas (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2024)), *tank-to-wheel* (SILVA, GONÇALVES, *et al.*, 2006)).

Após a perfuração e extração do petróleo cru, ele é transportado para a refinaria. Em uma mesma refinaria, são produzidos diversos dos subprodutos do petróleo, como a gasolina e o diesel. O petróleo cru é aquecido até que seja vaporizado e, então, tem acesso a uma torre de destilação atmosférica, que separa os subprodutos através dos diferentes pontos de ebulição (CANADA ENERGY REGULATOR, 2018). Tais subprodutos são processados e alguns transformados em gasolina e diesel.

Em relação ao etanol e ao biodiesel, cada biocombustível é originado a partir de matérias-primas diferentes, implicando em usinas com diferentes métodos de processamento.

A começar pela linha de produção do etanol, tendo como sua principal fonte de matéria-prima no Brasil a cana-de-açúcar. Diniz, Franco, *et al* (DINIZ, FRANCO, *et al.*, 2023) destacam que seu fluxo produtivo começa desde a etapa conhecida como pré-colheita, onde é feito o cultivo, o desenvolvimento das mudas, a colheita e o transporte para a agroindústria.

Em seguida, no processo de pós-colheita nas Usinas de Processamento, ela passa pelos processos de lavagem, tratamento para moagem e extração de seu caldo. Este por sua vez, é tratado, passa por um processo de evaporação, após, é cozido, passa por um processo de cristalização e outro de centrifugação. Então, seu mosto é preparado para

passar pelas etapas de fermentação e de destilação, para, por fim, ser obtido o etanol (QUEIROZ ALBARELLI, 2013).

A obtenção do biodiesel ocorre por meio de matérias-primas que possuem altos teores de ácidos graxos ou triglicerídeos. Quando ácidos graxos reagem com álcool, se tem um mecanismo do tipo esterificação. Através desta reação se obtém o éster (biodiesel) e água. As principais oleaginosas usadas para produzir biodiesel são: soja, dendê, coco, girassol, canola, mamona, amendoim e algodão (SANTOS, L. O.; MELO, G. F.; LAURENTINO, J. V. A., 2021).

Após a produção, os combustíveis são transportados até os distribuidores. No caso do Brasil, o diesel combustível tipo B contém 14% em volume de biodiesel na mistura (ANP, 2023), e a gasolina tipo C contém 27% em volume de etanol anidro (ANP, 2024b). As distribuidoras são, então, responsáveis por distribuir os combustíveis para os postos de abastecimento, onde serão fornecidos ao consumidor amplo. A Figura 5 ilustra os processos para obtenção dos combustíveis e as distribuições em emissões diretas e indiretas.

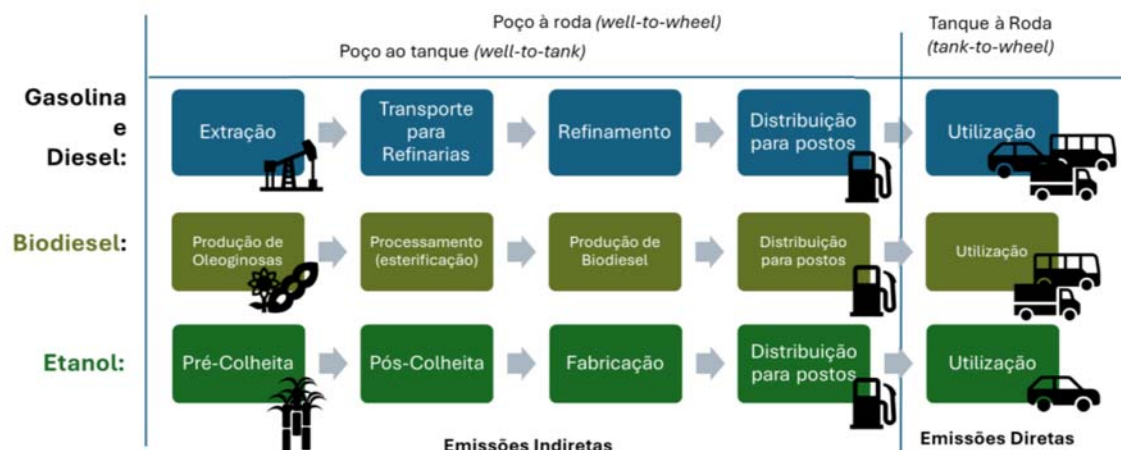


Figura 5 – Processos e emissões diretas e indiretas para os principais combustíveis em transportes (Fonte: Elaboração própria).

3.2.3. Aumento na demanda global por energia

O consumo mundial de energia tem aumentado significativamente ao longo das últimas décadas. De acordo com de Miranda, 2019, esse consumo pode aumentar em mais de 11 vezes até 2040, em um horizonte de apenas 100 anos (de 1940 até 2040). A Figura 6 mostra essa projeção.

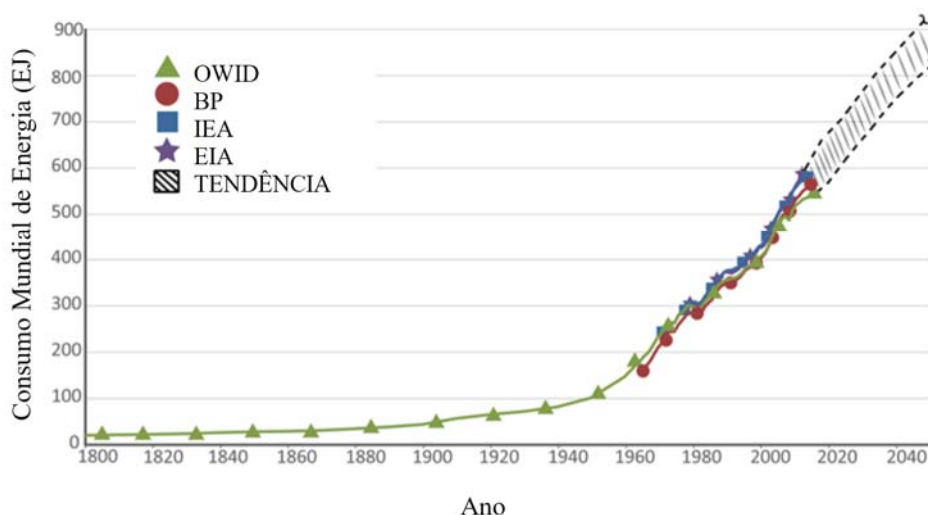


Figura 6 - Crescimento na demanda de energia mundial e projeções até 2040. Percebe-se que entre 1940 e 2040, a quantidade consumida de energia anualmente pode aumentar em mais de 11 vezes (traduzido de DE MIRANDA, Paulo Emilio V., 2019)

Muitos fatores contribuem para a crescente demanda por energia, mas talvez os mais importantes sejam o crescimento econômico, a mudança nos padrões de consumo e a eficiência energética dos processos.

O crescimento econômico de uma nação é diretamente proporcional ao consumo energético dela. De acordo com Moss e Kincer, 2023 (MOSS, KINCER, 2023), não há um só local no planeta onde a relação entre economia e consumo energético não se mantenha. E, de maneira mais assertiva, não há nenhum país desenvolvido que consuma pequenas quantidades de energia. A Figura 7 mostra essa relação.

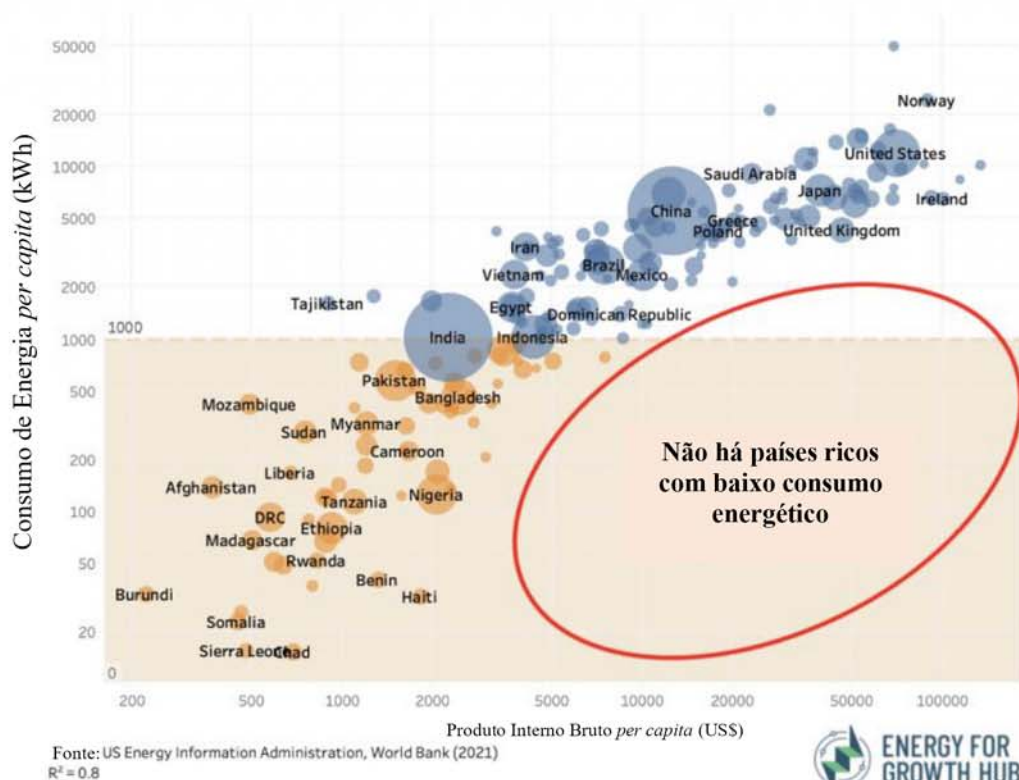


Figura 7 – Relação entre consumo energético de eletricidade *per capita* e PIB de diversos países. Percebe-se a relação direta entre desenvolvimento e consumo energético, no sentido que países desenvolvidos consomem notoriamente mais energia

per capita do que países subdesenvolvidos. (Fonte da imagem: traduzido de MOSS, KINCER, 2023)

Possíveis explicações para a relação intrínseca entre crescimento econômico e consumo de energia são a industrialização e mudança de tecnologia na produção de bens, uma vez que o setor fabril consome parcelas significativas de energia para maquinários em processos de fabricação, transporte de mercadorias e instalações industriais; o crescimento e digitalização do setor de serviços, que muitas vezes atua como suporte à industrialização; a urbanização e êxodo para cidades, resultantes de melhores perspectivas de vida e trabalho; e ao aumento na demanda por mobilidade, advinda do aumento populacional nos centros urbanos. De fato, a densidade populacional nas grandes cidades tem aumentado significativamente, à medida que o mundo se torna, progressivamente, mais industrializado.

A mudança nos padrões de consumo influencia de forma estrutural o consumo energético de uma região. O cidadão urbano demanda maior acesso à energia elétrica para o funcionamento de suas residências, escolas, hospitais e indústrias, bem como para aumentar sua produtividade. Os avanços tecnológicos também têm resultado no aumento da dependência de produtos industrializados e dispositivos elétricos e eletrônicos, como veículos, aparelhos pessoais, sistemas de aquecimento e refrigeração e sistemas de informação computadorizados. A Figura 8 mostra a tendência de crescimento populacional em áreas urbanas, em todos os continentes. Percebe-se que, após a década de 80, período no qual tanto a América do Norte quanto a Europa já apresentavam alto percentual de urbanização, essa tendência vem sendo mantida devido à industrialização e urbanização de países em desenvolvimento ou subdesenvolvidos na Ásia, América Latina e África. Da mesma maneira, a Figura 9 a e b apresentam o consumo energético per capita

por ano em diversas regiões do mundo, nos anos de 1982 e 2022. Percebe-se que, nas regiões que sofreram acentuado processo de urbanização nesse período (Ásia, América Latina e África), o consumo energético também aumentou expressivamente.

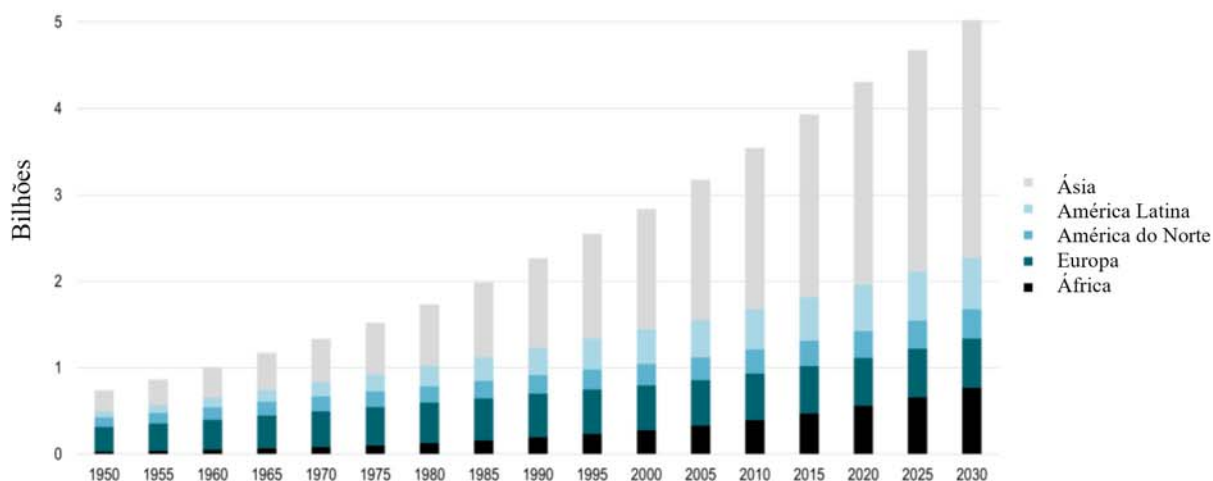
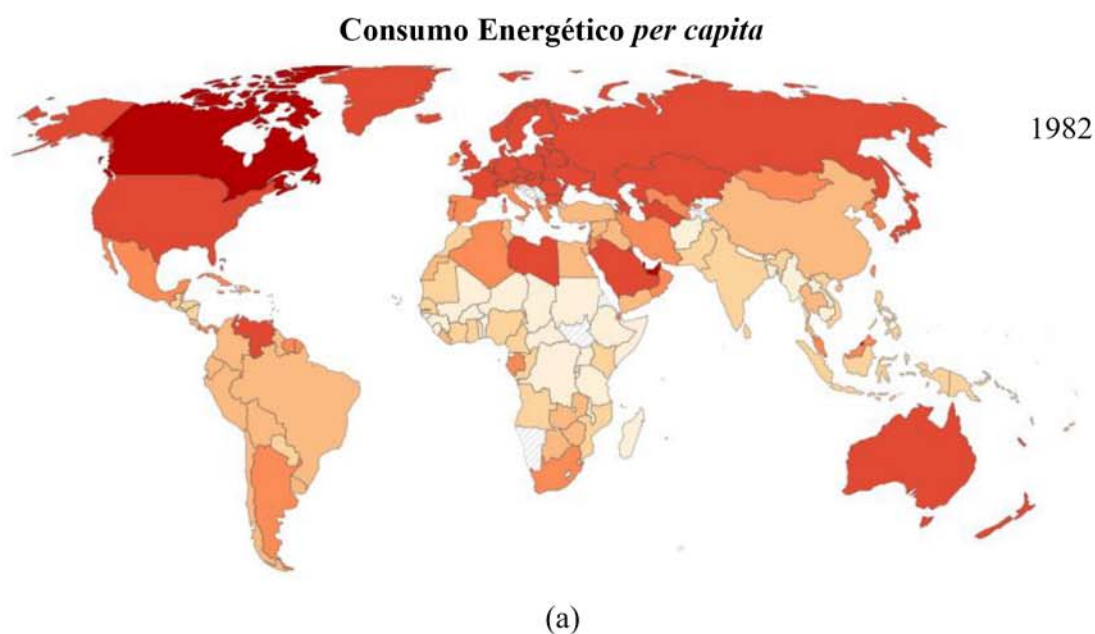
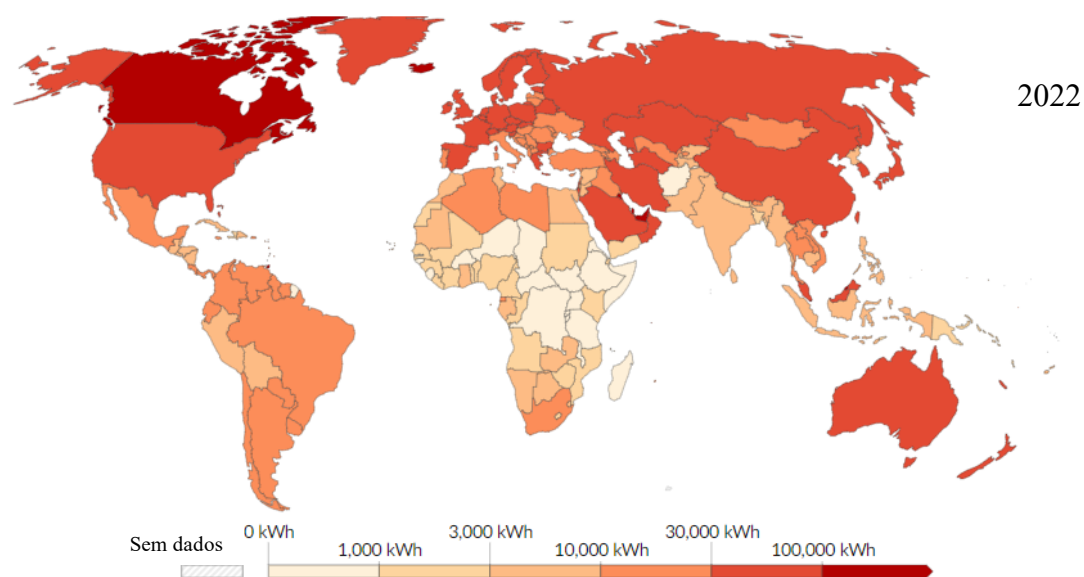


Figura 8 – Histórico e projeção de crescimento da população urbana (Fonte da imagem: Traduzido de RODRIGUE, 2020). Percebe-se uma tendência de crescimento quase linear a partir da década de 1980.





(b)

Figura 9 – Consumo energético per capita em 1982 e 2022. (Fonte da Imagem: Adaptado e traduzido de OUR WORLD IN DATA, 2023). No intervalo, regiões com maiores níveis de urbanização também apresentam maiores taxas de crescimento de consumo energético.

A eficiência energética refere-se à razão entre o estado final de energia útil e o estado inicial de energia fornecida na realização de uma determinada tarefa. Ela é característica de todos os processos existentes e o seu aumento está diretamente relacionado à redução do consumo energético. A busca pela maior eficiência energética é uma excelente forma de viabilizar o crescimento sustentável e reduzir emissões.

Tendo em vista as projeções de consumo energético global, a crescente tendência de urbanização e a mudança nos hábitos de consumo, é fundamental garantir a disponibilidade de fontes de energia com reduzidas emissões e a plena adoção de tecnologias mais eficientes no uso da energia.

3.2.4. Mudança climática e emissões em motores de combustão interna

Um dos principais gases provenientes da queima de combustíveis em motores de combustão interna para produção de energia é o dióxido de carbono (CO_2). O CO_2 é essencial para a manutenção da vida no planeta, uma vez que é um dos principais compostos para a realização da fotossíntese. Porém, em grandes quantidades ele torna-se um dos principais gases que provocam o efeito estufa, estando diretamente ligado ao aumento do aquecimento global (EPA, 2021). A Figura 10 mostra a concentração de CO_2 na atmosfera e a temperatura média global desde 500 milhões de anos atrás até o presente. No eixo vertical são mostrados os anos até o presente (YBP, *years before present*) e nos eixos horizontais são mostradas a concentração de CO_2 na atmosfera e a temperatura média global.

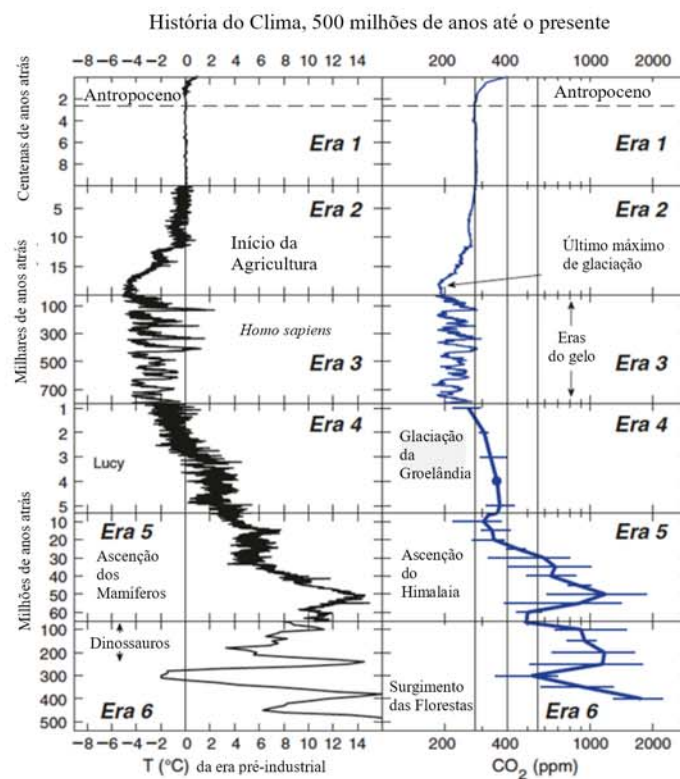


Figura 10 - Concentração de CO₂ na atmosfera e temperatura média global. (Traduzido e adaptado de SALAWITCH, CANTY, *et al.*, 2017). Percebe-se que desde o início do antropoceno, ambas aumentam na mesma proporção.

Percebe-se pela Figura 10 uma relação direta entre a concentração de CO₂ na atmosfera e a temperatura média global, uma vez que os picos e vales de ambas as curvas coincidem. Essa relação se mantém constante até mesmo durante os períodos de glaciações pelos quais a Terra passou. A partir do início do antropoceno³, período marcado pela Revolução Industrial e pelo aumento da demanda humana por energia, a concentração de CO₂ na atmosfera cresceu consideravelmente, em consonância com a temperatura média global. Não à toa, a taxa de aquecimento que presenciamos é aproximadamente 10 vezes maior que o esperado após uma era glacial e a emissão de carbono, impulsionado por atividades humanas, aumenta aproximadamente 250 vezes mais rápido que nesses períodos (NASA, 2022).

É esperado que, caso a emissão de gases do efeito estufa não seja reduzida e o aquecimento global não seja limitado em até 1,5 °C médios em relação aos valores pré-industriais, catástrofes (eventos climáticos extremos) como desertificação, inundações de cidades litorâneas e desaparecimento de fauna e flora ocorram ainda nesse século (U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2024).

³ Período marcado pelo grande impacto ambiental da atividade humana no planeta. Embora a sua data de início seja alvo de discussões, pode-se determiná-la como na primeira revolução industrial, após o advento da máquina a vapor, a partir de 1765.

O observatório de Mauna Loa, no Haváí, mantém os registros mais antigos de medições de concentrações de CO₂ na atmosfera, em ppm, com início das medições em 1958. A Figura 11 mostra a tendência de crescimento dessa concentração em relação aos anos. Percebe-se que existe tendência exponencial de crescimento.

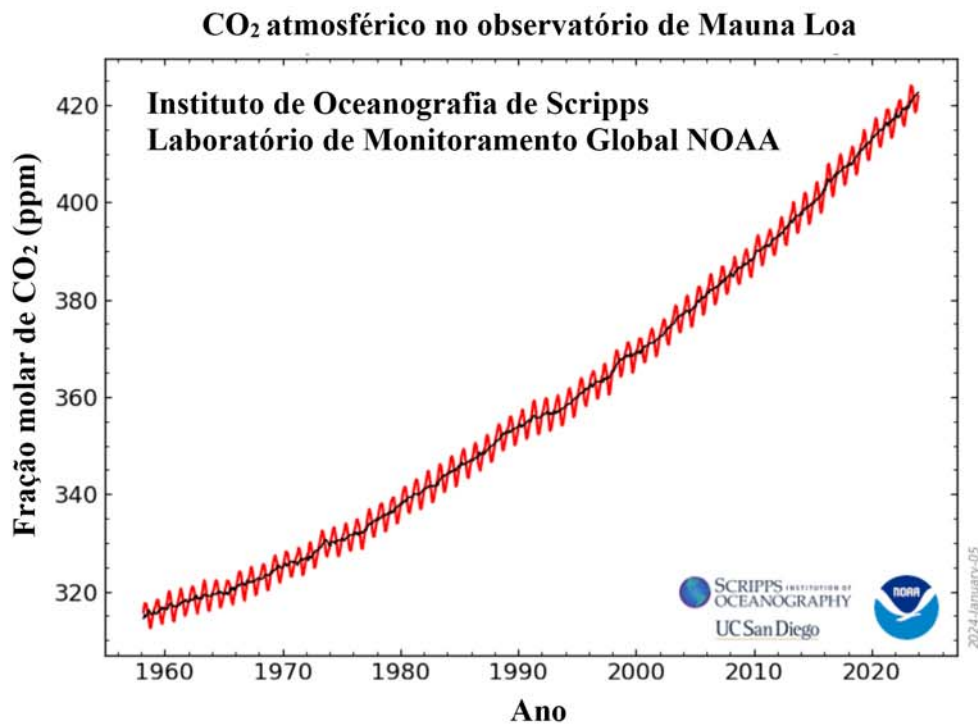


Figura 11 –Variação da concentração de CO₂ na atmosfera desde 1958 até os dias de hoje. Percebe-se tendência de aumento praticamente linear. (Fonte da imagem: Traduzido de US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA, 2024).

De fato, em junho de 2022, foram observadas em Mauna Loa concentrações de CO₂ na atmosfera da ordem de 421 ppm, valores até então não evidenciados em um horizonte de milhões de anos (NOAA, 2022). Segundo Hansen *et al*, o aumento da temperatura média para o ano de 2022 foi de 1,16°C, o quinto ano mais quente desde os valores base no período de 1880-1920, e aproximadamente 0,04°C mais quente que 2021 (HANSEN, SATO, *et al.*, 2022). De forma diretamente relacionada, muitas das decorrências do aquecimento global já podem ser observadas hoje. Alguns exemplos são

a diminuição das calotas polares, com a perda de 280 bilhões de toneladas de gelo por ano na Groelândia e de 150 bilhões de toneladas de gelo por ano na Antártica, o aumento do nível dos oceanos, de mais de 20 cm desde 1900, e a ocorrência de eventos climáticos extremos, como tufões, desregularização das precipitações e ondas de calor e de frio intensas (NASA, 2022). A magnitude desses valores e de suas consequências demonstra a urgência em decisões e ações, em curtíssimo prazo, que diminuam significativamente as emissões de gases do efeito estufa.

Reconhecendo que o aquecimento global é uma ameaça urgente que necessita de intervenções, o Acordo de Paris foi aprovado pelos países membros da *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC). Os países que assinaram o acordo comprometeram-se em diminuir as emissões de gases do efeito estufa (GEE), através de metas auto impostas, visando um horizonte de zero emissões em longo prazo (UN, 2015).

No Brasil, as metas estabelecidas são de reduzir as emissões de GEE em 37% em relação aos valores de 2005 até o ano de 2025, e em 43% em relação aos valores de 2005 até o ano de 2030 (FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL, 2015). De acordo com a Associação Brasileira de Veículos Elétricos (ABVE, 2021), isso representaria a emissão de 1,2 bilhão de toneladas de CO₂e em 2030, comparadas com cerca de 1,6 bilhão emitidas hoje.

Além do CO₂, outros gases também são produtos de emissões por motores de combustão interna. Particularmente, os principais, e que serão escopo do trabalho aqui realizado, são o monóxido de carbono (CO), os hidrocarbonetos não reagidos (HC) e os óxidos de nitrogênio (NO_x).

O CO é gasoso em temperatura ambiente, inodoro e incolor. Em motores, sua produção é aumentada quando se potencializa a queima incompleta de combustíveis carbonosos. A queima incompleta ocorre quando a quantidade de oxigênio disponível não é suficiente para a queima em proporções estequiométricas do combustível. Em condições reais, parte da queima sempre se dará de forma incompleta. Em especial, a produção de CO é amplificada em situações de partida a frio, – quando o catalisador ainda não está em operação –, em mudanças acentuadas nas taxas de acelerações e em condições de tráfego congestionado.

De acordo com CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD, 2024, o CO é altamente tóxico, uma vez que tem o potencial de se ligar a hemoglobinas do sangue e reduzir suas capacidades de carregar oxigênio para órgãos e tecidos. Efeitos primário incluem fadiga, dores de cabeça, confusão e tontura provenientes da má oxigenação do cérebro e podem evoluir até a morte. A toxicidade do CO é particularmente perigosa em ambientes fechados. Por não ter cor ou odor, existem muitos casos de morte acidental por intoxicação por CO.

O CO também contribui para a formação de ozônio troposférico, um gás do efeito estufa, quando na presença de compostos orgânicos e NO_x em baixas altitudes (RIDLEY, ANDREAE, *et al.*, 1994 e AINSWORTH, LEMONNIER, *et al.*, 2020). Em última instância, o ozônio troposférico atua na formação de *smog* fotoquímico, que é responsável por problemas respiratórios e influencia negativamente a taxa de fotossíntese das plantas, contribuindo indiretamente para o aumento do aquecimento global.

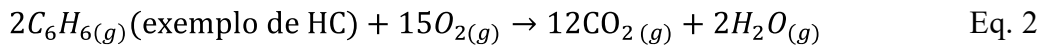
Hidrocarbonetos não reagidos, no contexto de motores de combustão interna, são compostos orgânicos não queimados ou parcialmente queimados durante a combustão. Eles podem ser divididos em alcanos, hidrocarbonetos simples com cadeias de carbono lineares ou ramificadas, como é o caso do metano, etano e propano; alcenos,

hidrocarbonetos com pelo menos uma ligação dupla-carbono, como o eteno e o buteno; e os aromáticos, com anéis de carbono e ligações duplas alternadas, como o benzeno e o tolueno (VALLERO, 2007). Comumente, ocorrem durante a partida a frio, ou em momentos de mudanças bruscas de condições de operação. Em especial, ocorrem também dentro do cilindro do motor em partes em que a mistura ar-combustível é afetada com menor intensidade pela chama da combustão, formando hidrocarbonetos intermediários. Da mesma forma que o CO, também contribuem para a formação de ozônio troposférico e subsequente *smog* fotoquímico. Hidrocarbonetos não reagidos causam problemas respiratórios e algumas espécies podem ser cancerígenas.

Os NO_x são uma família de compostos formados pela combinação de nitrogênio e oxigênio durante processos de combustão. A taxa de produção de NO_x está diretamente relacionada com a temperatura da combustão. Acima de 1300 °C, espera-se que todo oxigênio livre reaja com nitrogênio e forme NO_x. Abaixo de 760 °C, quase não há formação de NO_x (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999). A espécie mais proeminente é o monóxido de nitrogênio (NO), seguido de dióxido de nitrogênio (NO₂), mas também podem ser encontradas em quantidades menores o óxido nitroso (N₂O), dentre outros. O monóxido de nitrogênio é, em maior parte, oxidado em NO₂ na atmosfera, mas também pode participar de reações fotoquímicas para formação de ozônio troposférico. O NO₂ é um dos componentes principais para a poluição do ar, contribuindo para problemas respiratórios e irritação dos olhos. O N₂O, por sua vez, é um potente gás do efeito estufa. Em linhas gerais, além das contribuições para a formação de ozônio troposférico e *smog* fotoquímico já discutidas, os NO_x também pode reagir com a água para formar ácido nítrico, contribuindo para a chuva ácida (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1999). A chuva ácida danifica ecossistemas terrestres e marinhos, afetando a vegetação, solos e corpos d'água. O contato com NO_x também pode

causar irritação aos olhos, nariz, garganta e pulmão, e em quantidades elevadas pode causar dificuldades de respiração, espasmos e até a morte (ATSDR, 2002).

Uma das formas de reduzir a emissão de CO, HC e NO_x em veículos é através da utilização de conversores catalíticos de três caminhos (KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, *et al.*, 2021). Conversores catalíticos são equipamentos instalados na tubulação de escapamento de veículos, que têm por finalidades promover reações de oxidação e redução em compostos específicos, produtos da combustão. As espécies oxidadas e reduzidas são menos reativas e apresentam menores riscos e impactos tanto ambientais como para a saúde humana. No caso do CO e dos HC, o produto das oxidações é o CO₂. No caso do NO_x, o produto da redução é o nitrogênio molecular (N₂). Essas reações são mostradas nas Equações 1, 2 e 3 (KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, *et al.*, 2021). A Figura 12 mostra um conversor catalítico de três caminhos típico.



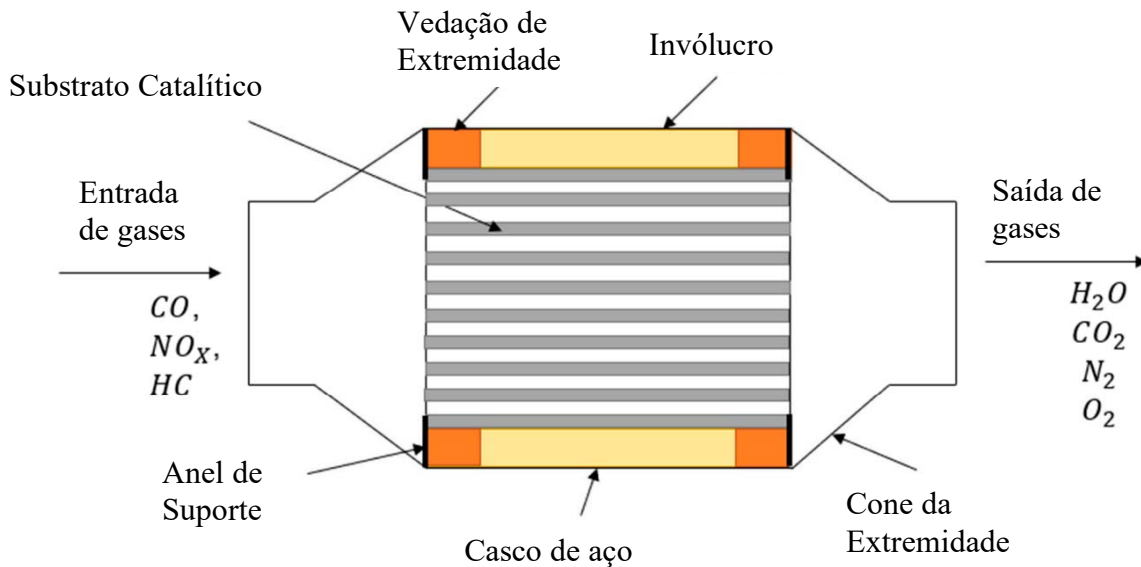


Figura 12 – Conversor catalítico de três caminhos típico para a equação de combustão completa. (Fonte da Imagem: Adaptado de KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, *et al.*, 2021) Nos casos da combustão real, nos gases de escape também são encontradas espécies químicas não reagidas, como HC, CO e NO_x.

Os conversores catalíticos dependem de condições especiais de temperatura para operação, em geral acima de 350 °C (KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, *et al.*, 2021), motivo pelo qual não funcionam em partidas a frio, sendo essa a condição em que o veículo mais emite CO, HC e NO_x.

A condição de operação do motor (mistura pobre ou rica) influencia diretamente na eficiência do catalisador. Quando há excesso de oxigênio no escapamento (mistura pobre), as reações de oxidação do CO e dos HC são promovidas, em detrimento da redução do NO_x. Quando há excesso de combustível (mistura rica), a redução do NO_x é promovida, em detrimento da oxidação do CO e dos HC. O ponto de operação estequiométrico representa a maior eficiência possível do conversor catalítico considerando as três espécies de emissões. Nesse ponto, em temperaturas elevadas, a

eficiência típica de um conversor catalítico de três caminhos é em torno de 85% para os três poluentes. (KRITSANAVIPARKPORN, BAENA-MORENO, *et al.*, 2021).

Um outro subproduto da queima de combustíveis fósseis é o material particulado (MP). Esse é composto por partículas muito finas, com menos de 2,5 micrometros de diâmetro. Devido ao seu tamanho diminuto, o MP penetra pelo sistema respiratório até os alvéolos pulmonares e está diretamente ligado à ocorrência de doenças cardíacas e respiratórias. Além disso, o MP também contribui diretamente com a ocorrência de neblinas, chuva ácida, acidificação de rios e lagos, etc (EPA, 2021). O gráfico da Figura 13 mostra a relação entre o MP presente no ar e a mortalidade a cada 100.000 habitantes em algumas das principais cidades europeias. Percebe-se que os picos se coincidem, ou seja, o nível de poluição por material particulado no ar é diretamente proporcional ao número de mortes por problemas cardíacos e respiratórios nessas cidades.

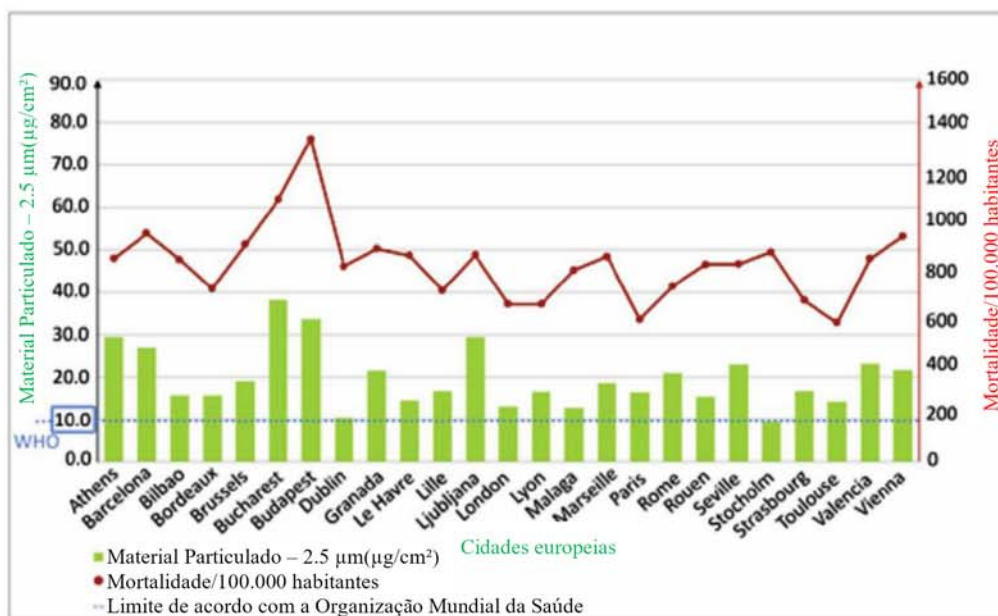


Figura 13 - Relação entre o MP presente no ar e a mortalidade a cada 100.000 habitantes nas principais cidades europeias. (DE MIRANDA, P.E.V., 2013)

Assim, percebe-se a urgência da adoção em escala de novas tecnologias em transportes que possuam menores emissões, produzam menos poluentes e que utilizem a energia de forma mais eficiente.

3.2.5. Segurança energética e externalidades do diesel no impacto do setor de transportes

O setor de transportes é um dos que mais demanda energia e emite poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa. De acordo o relatório *CO₂ Emissions 2022* da Agência Internacional de Energia, aproximadamente 22% do CO₂ emitido no mundo é proveniente do setor de transportes.

O Brasil possui uma matriz energética e elétrica altamente renováveis, com percentuais de renovabilidade acima dos, respectivamente, 45% e 85%. Fontes de energia renováveis emitem, notoriamente, menos gases do efeito estufa no seu ciclo de vida quando comparadas a fontes fósseis sem abatimento. Em linhas gerais, no Brasil as emissões de GEE podem ser divididas em um terço para cada setor, agricultura, energia e mudança de uso da terra (KOBBERLE, ROCHEDO, *et al.*, 2020). Apesar do seu potencial renovável, o setor de transportes no Brasil é, dentre os setores que consomem energia, o setor que mais emite gases do efeito estufa, representando quase 50% das emissões totais de CO₂e desse setor no país (Figura 14 - EPE, 2023).

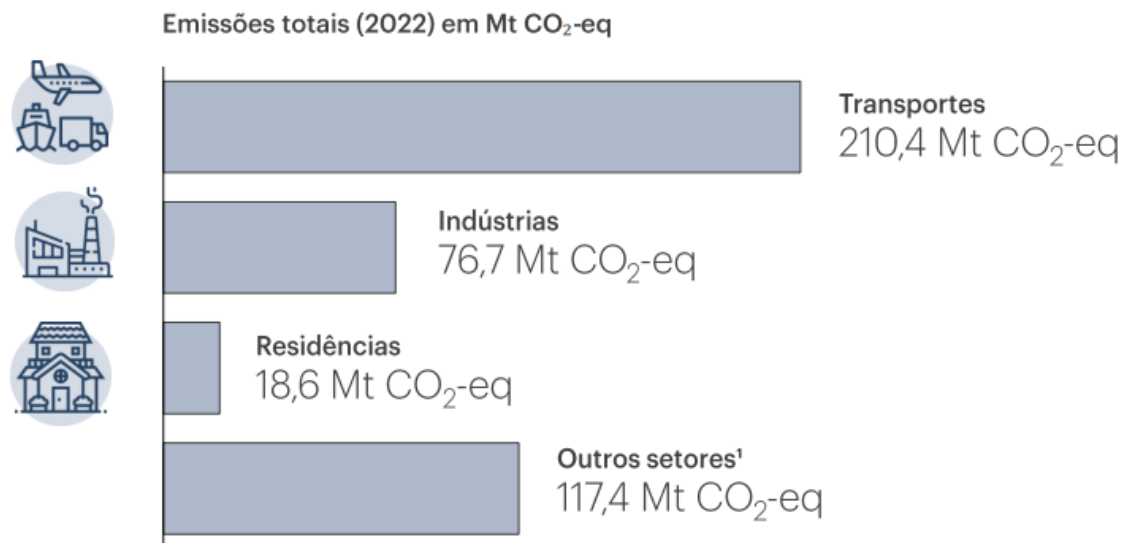


Figura 14 - Emissões de CO₂e do setor que consome energia no Brasil para o ano de 2022. Percebe-se a magnitude de emissões do setor de transportes, incontestavelmente em primeiro lugar, com 49,7% das emissões para esse setor. (Fonte da imagem: adaptado de EPE, 2023)

Além de prejuízos ambientais, a matriz energética para transportes brasileira também traz consigo inseguranças energéticas. É fato que ela é fortemente concentrada no modal rodoviário. De acordo com o estudo sobre políticas públicas para veículos híbridos e elétricos do BNDES Setorial (VAZ, BARROS, *et al.*, 2015), 67% de todos os volumes no Brasil são transportados desta maneira. Tradicionalmente, o setor rodoviário é caracterizado pela utilização de combustíveis fósseis de alta emissão – o diesel e a gasolina. A Empresa de Pesquisa Energética, através do Relatório Síntese 2023, mostra que a porcentagem de participação energética do diesel e da gasolina nos transportes, juntos é superior a 61% (Figura 15).

Participação das fontes energéticas nos Transportes:

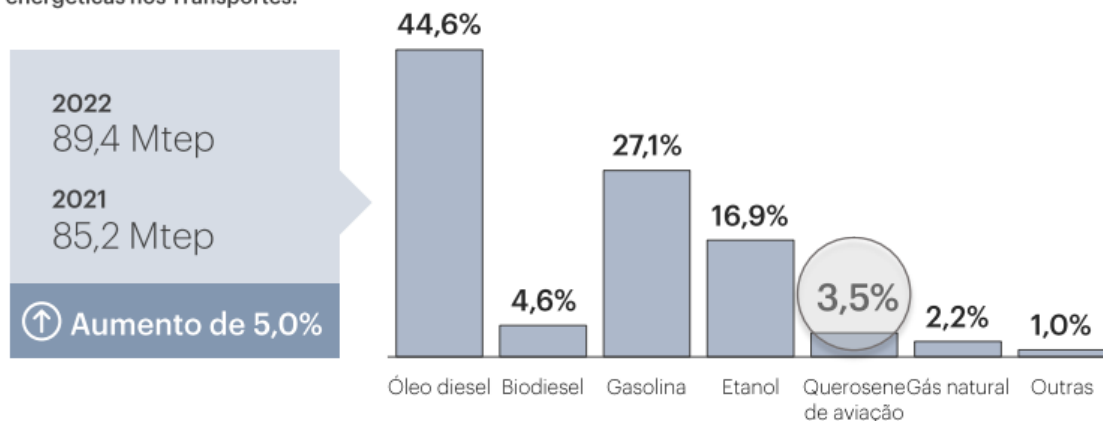


Figura 15 – Participação do diesel e da gasolina nas fontes energéticas para o setor de transportes. (Fonte da Figura: Adaptado de EPE, 2023). Percebe-se que ambos, gasolina e diesel, somados, perfazem mais de 61% do total de energia consumida em transportes no Brasil.

Em linhas gerais, apesar de suas características renováveis, na matriz energética brasileira a fonte de energia mais utilizada ainda é, de fato, o óleo diesel, à frente até da eletricidade, com a gasolina na quarta posição (Tabela 4).

Tabela 4 – Consumo final por fonte de energia no Brasil em 2021 e 2022. Adaptado de (EPE, 2023).

Fonte	2021	2022
Óleo Diesel ²	51.538	53.091
Eletricidade	49.264	50.403
Bagaço de Cana	28.279	28.018
Gasolina ³	22.137	24.227
Gás Natural	15.919	16.103
Lenha	18.288	18.440
Etanol	14.848	15.165
GLP	8.298	8.211
Lixívia	7.294	8.039
Óleo Combustível	2.470	2.431
Querosene	2.518	3.132
Outras Fontes ⁴	29.160	28.115
TOTAL	250.014	255.375

Essa grande dependência é refletida nas incertezas de preços e disponibilidades, uma vez que os maiores produtores de petróleo mundiais se localizam em regiões de grande instabilidade política. Em 2022 por exemplo, o déficit do diesel brasileiro foi de 16 milhões de m³. Já para a gasolina, o déficit em 2022 foi da ordem de 4 milhões de m³. Esses dados são mostrados no gráfico da Figura 16. Percebe-se que para todo o período analisado, a dependência brasileira de combustíveis fósseis estrangeiros é grande, e com tendências de crescimento.

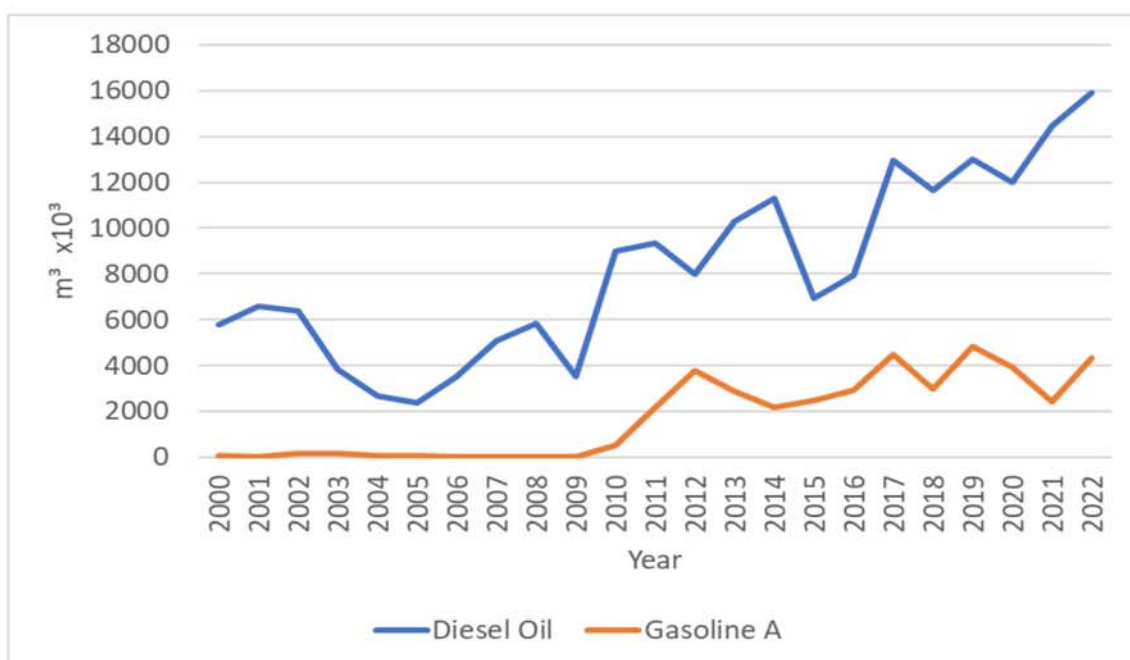


Figura 16 – Evolução do déficit brasileiro na produção de diesel e gasolina, que mostra tendências de crescimento desde 2005. (Elaboração própria com dados de ANP, 2024)

Economicamente, existe um conceito de que tecnologias menos poluentes em transportes não devem induzir custos adicionais aos já existentes. Contudo, de Miranda, 2019, mostrou que essa afirmação não transcreve todo o contexto de custos, e por isso tal comparação não acontece em equidade (DE MIRANDA, Paulo Emílio V., 2019). Notoriamente, combustíveis fósseis não arcam com os custos indiretos da sua utilização, como por exemplo custos com medidas de compensação em externalidades. Dentre elas custos para mitigação de impactos climáticos, programas de controle de emissões,

redução na produção de lavouras devido a altas concentrações de ozônio, acidificação dos solos e chuva ácida, dentre outros (DE MIRANDA, Paulo Emílio V., 2019). Dessa forma, o custo de combustíveis fósseis é arcado pela população em geral e, em partes, pelas novas tecnologias menos poluentes.

Com a crescente urbanização, aumento de demanda por mobilidade e face à responsabilidade que o setor de transportes tem na emissão de poluentes atmosféricos e GEE principalmente no Brasil, a sua descarbonização torna-se bastante impactante. Para tal, uma opção é a substituição da utilização do óleo diesel por combustíveis renováveis, como por exemplo o etanol, em veículos com melhor eficiência energética.

3.2.6. O sucesso do etanol brasileiro

Os primeiros experimentos com etanol como combustível em transportes datam de 1826, quando o primeiro motor de combustão interna desenvolvido nos Estados Unidos por Samuel Morey funcionou com mistura de etanol e terebentina, um tipo de óleo essencial (ALPHA HOLDINGS, 2019). O motor foi utilizado para mover um pequeno barco no rio Connecticut. Mais tarde, em 1860 o etanol foi também utilizado pelo próprio Nicolaus Otto, inventor do ciclo Otto, em um motor de quatro tempos. (ALPHA HOLDINGS, 2019). Mundialmente, desde o início do século XX o uso do álcool como combustível já era considerado por instituições de desenvolvimento automotivo. O próprio Henry Ford previu para o New York Times em 1925 que o álcool seria o combustível do futuro (KOVARIK, 2021).

O Brasil tem uma longa história e experiência no desenvolvimento de processos para fabricação e utilização de etanol combustível. No país, os primeiros estudos a considerar a utilização de etanol como combustível datam de 1922, quando o então presidente, Arthur Bernardes, encomendou à Estação Experimental de Combustíveis e Minérios (EECM) um projeto de desenvolvimento de motores movidos a álcool

(MARCOLIN, 2021). As experiências tiveram como principais objetivos descobrir as causas prováveis das corrosões observadas em diversas peças de motor quando alimentado com álcool; as melhores condições para perfeita queima do combustível; o consumo específico e fatores que influenciam no rendimento térmico do motor (MARCOLIN, 2021). O principal objetivo não era de substituir inteiramente a gasolina por etanol, mas sim de tornar viável a mistura dos dois e incentivar a produção do combustível em território nacional. Em 1925 o primeiro modelo Ford T percorreu 230 quilômetros (km) no Circuito da Gávea no Rio de Janeiro, utilizando o álcool como combustível e consumo de 20 l/km, com uma mistura de álcool etílico hidratado 70% (MARCOLIN, 2021). Na década de 1930 diversas leis estaduais e municipais já estabeleciam que deveria ser adicionado de 5% a 10% de etanol na gasolina e, a partir de então, o país investiu na produção de álcool anidro, com pequena quantidade de água, mas compatível com motores a explosão (MARCOLIN, 2021).

Em 1975, houve um grande fomento em políticas públicas para uso do etanol, quando o governo brasileiro, impulsionado em grande parte pela elevação dos preços do petróleo internacionalmente, criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool) (BARBOSA CORTEZ, CRUZ, *et al.*, 2016). O programa contou com o apoio de empresários e da comunidade científica e incentivou a produção e consumo do combustível. Ele é hoje considerado um marco no desenvolvimento tecnológico do Brasil. Em 1979 foi lançado o primeiro carro totalmente adaptado para utilizar etanol combustível (BARBOSA CORTEZ, CRUZ, *et al.*, 2016).

No fim da década de 1980, o preço do barril de petróleo voltou a patamares costumeiros, e com isso reduziu-se também o preço da gasolina. Apesar dos marcantes desenvolvimentos na utilização do etanol como combustível, não foi possível competir com o preço da gasolina mais barata. Não obstante, muitos produtores de etanol passaram

a produzir açúcar devido à alta do preço desse produto no mercado externo e a facilidade de conversão de suas bases tecnológicas instaladas. Todos esses fatores resultaram em escassez de etanol combustível no mercado interno, o que trouxe descrédito aos carros que funcionavam com essa tecnologia, reduzindo a sua participação no mercado.

Na década de 90, o etanol hidratado teve o seu preço reduzido, e muitos consumidores de gasolina passaram a adicionar, de forma independente, quantidades adicionais à já padronizada mistura de etanol na gasolina de seus veículos. (BARBOSA CORTEZ, CRUZ, *et al.*, 2016). Essa prática levou algumas montadoras a considerarem a introdução de um motor capaz de operar com quaisquer misturas entre gasolina e etanol. Em 2003 foi lançado o primeiro veículo denominado *flex-fuel*. Esses veículos possuem sensores cerâmicos eletrônicos e computador de bordo que reconhecem a composição do combustível a partir do percentual de oxigênio no escapamento e ajustam os parâmetros da combustão, permitindo a utilização de gasolina e etanol em qualquer mistura, de forma transparente ao motorista (ANDERSON, 2009). A popularização do *flex-fuel* ampliou novamente a produção de cana-de-açúcar e de etanol no país, fato que se propaga até os dias de hoje. Atualmente, EUA e Brasil lideram a produção mundial de etanol, com aproximadamente 82% do total de etanol produzido no mundo (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2023). De fato, o Brasil é o único país no mundo com a experiência da implantação bem-sucedida de um tipo de biocombustível em escala nacional.

No gráfico da Figura 17 é mostrada a evolução do licenciamento de automóveis separada por tipos de combustível (elaboração própria com dados de ANFAVEA, 2023). Percebe-se que durante o período do Próalcool a quantidade de carros puramente a etanol produzidos chegou a ser maior que duas vezes a dos carros a gasolina, com o subsequente encerramento de sua produção na década de 1990. Percebe-se também que em 2003, com o advento do motor *flex-fuel* - caracterizado por operar com gasolina, etanol e misturas

dos dois combustíveis -, e por sua conseguinte dominância de mercado, a participação do etanol no mercado voltou a crescer. Hoje o modelo *flex-fuel* é maioria absoluta em licenciamentos.

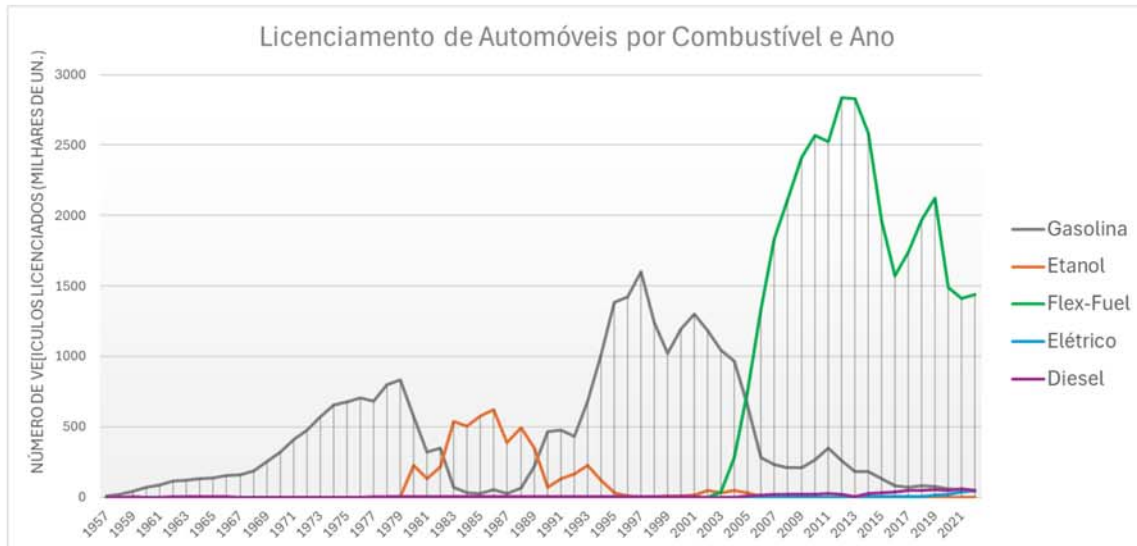


Figura 17 – Produção anual de autoveículos segregada por tipo de combustível (elaboração própria com dados de ANFAVEA, 2023). Percebe-se pelo gráfico o período de atividade do Proálcool, quando o licenciamento de veículos puramente a etanol ultrapassou o licenciamento de veículos puramente a gasolina, e também o advento do veículo *flex-fuel* em 2003, hoje maioria absoluta de licenciamentos.

3.2.7. Veículos híbridos como viabilização tecnológica e climática

Em um veículo puramente elétrico, o MCI é substituído por um motor elétrico, e a energia necessária para a tração é fornecida por uma ou várias baterias de alta densidade energética embarcadas, dimensionadas para a utilização específica. Alguns modelos também são equipados com sistema de freios regenerativos, que convertem parte da energia cinética durante a frenagem em energia elétrica para recarregar as baterias. Esse tipo de veículo tem por característica não emitir nenhum poluente durante a operação, sendo a opção mais ambientalmente favorável.

Contudo, apesar de todas as pesquisas e investimentos em baterias, ainda existe uma “ansiedade por autonomia”, que se traduz como um medo ou ansiedade de não alcançar o destino antes da bateria do veículo descarregar. Essa questão torna-se um problema ainda maior em veículos pesados que, geralmente, precisam percorrer grandes distâncias com cargas elevadas, demandando uma grande quantidade de energia. Nesse caso, esses veículos, se completamente elétricos, precisam dispor de uma grande quantidade de baterias embarcadas, elevando o seu peso, o seu custo de aquisição, a quantidade de lixo tecnológico após a sua vida útil e reduzindo o peso da carga admissível para um mesmo peso bruto total. Outros complicadores são a necessidade da criação de infraestrutura para reabastecimento elétrico de alta potência, bem como o tempo de recarga do veículo. Enquanto a tecnologia existente para baterias e carregadores ainda não fornece autonomia confortável para o usuário que necessita realizar longos trajetos, uma solução é a utilização de veículos híbridos.

Veículos híbridos são veículos que combinam dois ou mais tipos de tecnologias que fornecem a energia para a sua tração. Em sua maioria, utilizam um motor elétrico em conjunto com um MCI. Veículos híbridos são, em geral, mais eficientes que veículos convencionais com motor a combustão interna. Por também disporem de tração puramente elétrica, veículos híbridos podem funcionar em “modo silencioso”, desligando seus MCIs e utilizando somente a energia das baterias com o motor elétrico. Isso pode ser especialmente vantajoso em trajetos urbanos onde a densidade de emissões e a poluição sonora são problemas mais relevantes. Veículos eletrificados, em geral, também possuem menos peças em sua composição do que veículos tradicionais. Esse fato, por si só, diminui o tempo e o custo de manutenção da frota (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2023) e traz uma maior confiabilidade técnica e vida útil ao produto. No caso de veículos em transporte público, com o tempo em manutenção reduzido e a

confiabilidade aumentada, aumenta-se também a regularidade de linhas e ainda é possível reduzir a tarifa de utilização.

Dependendo da arquitetura, um veículo híbrido pode ter sua configuração em paralelo ou em série.

Na configuração em paralelo, tanto o MCI como o motor elétrico fornecem energia mecânica para as rodas do veículo, variando o torque de cada um conforme o regime de operação demandado pelo condutor do veículo e pelo trajeto. Nessa configuração, as rotações tanto do MCI como do motor elétrico estão sincronizadas entre si e intimamente relacionadas com a velocidade angular das rodas do veículo.

Na configuração em série, os MCI atuam essencialmente como extensores de autonomia. Extensores de autonomia são equipamentos capazes de produzir energia elétrica a bordo de forma a recarregar as baterias. Dessa forma, o MCI é acoplado a um gerador que recarrega um conjunto de baterias embarcadas. Essas, por sua vez, alimentam o motor elétrico de tração, que fornece energia mecânica para as rodas. Nessa configuração, o funcionamento do MCI independe da velocidade do veículo, podendo operar em diferentes rotações, a qualquer momento.

Além de reduzir a ansiedade por autonomia, os veículos híbridos em série possuem diversas outras vantagens. Uma vez que o MCI não tem conexão direta com o eixo que traciona o veículo, o MCI pode funcionar em regime permanente, em seu ponto de maior eficiência, independente da velocidade linear do veículo. O aumento na eficiência se traduz em redução do consumo de combustível e do tamanho do motor, o que implica na redução das emissões de GEE e do peso bruto total em comparação com veículos totalmente elétricos. Esses veículos apresentam também aumento na autonomia, redução no tamanho do tanque de combustível e redução no tempo de abastecimento.

Veículos híbridos e totalmente elétricos são tecnologias mais recentes do que veículos com MCI. Dessa forma, para sua inserção no mercado e adoção em larga escala, são necessárias discussões de cunho regulatório e, em última instância, incentivos para sua produção e demanda.

Nesse contexto, a mobilidade eletrificada já está presente no cotidiano de muitos países no mundo. Em 2010, a iniciativa *The Electric Vehicle Initiative* foi criada como um braço do *Clean Energy Ministerial* para promover a adoção de veículos eletrificados. Desde então, veículos elétricos e híbridos *plug-in* ganham espaço no mercado pelo seu desempenho e potencial de redução de emissões. A Figura 18 mostra a progressão no estoque de automóveis elétricos e híbridos em diversas regiões no mundo, onde BEV significa *Battery Electric Vehicle* – Veículo Elétrico a Bateria e PHEV significa *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* – Veículo Elétrico-Híbrido Plug-In. Percebe-se que, desde 2010, quando a iniciativa *The Electric Vehicle Initiative* foi criada, até 2022, o crescimento na produção tem acontecido de forma exponencial, com a China liderando tanto o mercado de automóveis completamente elétricos quanto o de híbridos.

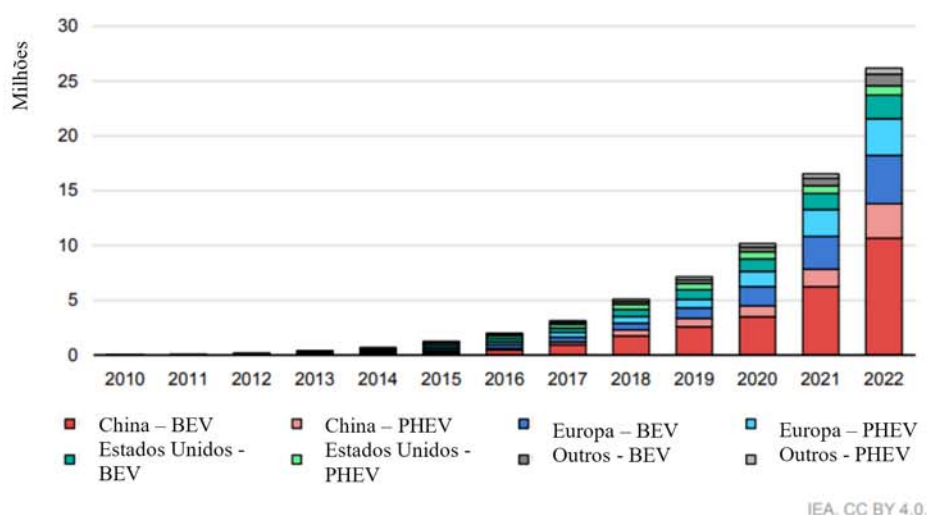


Figura 18 – Progressão no estoque de automóveis elétricos e híbridos. Percebe-se que grande parte da fatia de mercado para ambas as tecnologias está na China, mais da

metade do total. (Fonte da image: traduzido de INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023b).

Tal progressão é resultado também de políticas públicas direcionadas à redução de emissões. Nos Estados Unidos, por exemplo, o *Inflation Reduction Act* apresenta incentivos e redução em taxas para iniciativas que visem fomentar economia de menor emissão assim como a indústria nacional. Para veículos elétricos e híbridos de grande autonomia produzidos nos Estados Unidos, o *Clean Vehicle Tax Credit* sugere preços factíveis para revenda e define incentivos ao consumidor, que podem chegar a até US\$7.500,00 por unidade adquirida (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). O *Inflation Reduction Act* também inclui incentivos para a produção de baterias em território americano que podem chegar a até US\$35,00 por kWh, com US\$10,00 adicionais para a produção do módulo de baterias (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023).

Já na China, parte do seu protagonismo em veículos eletrificados é decorrente do pioneirismo na produção e de estratégias adiantadas para sua inserção no mercado. Desde 2017 o país provê subsídios para aquisição desses veículos. A ideia inicial era manter os subsídios até 2025, quando se esperava que a parcela total de veículos eletrificados fosse de pelo menos 20%. Contudo, em 2022 esse valor já ultrapassava os 30%. Dessa forma, os subsídios permaneceram até o fim de 2023 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2023). Em Shanghai, por exemplo, o governo federal reservou parcela das vagas de estacionamento, como no distrito de Jiading, onde se localiza a Universidade de Shanghai, exclusivas para veículos eletrificados. Além disso, ônibus e taxis elétricos já tinham prioridade para operar na cidade em relação aos modelos convencionais desde sua inserção (HALL, MOULTAK, *et al.*, 2017).

No Brasil, embora o setor de transportes seja o maior responsável por emissões de gases do efeito estufa, ainda existem poucas regulamentações e incentivos direcionados

especificamente para veículos híbridos ou elétricos. O Programa Rota 2030, por exemplo, define incentivos em IPI e IOF no financiamento de veículos híbridos e elétricos (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL, 2018). Muitos estados também fornecem descontos ou isenção de IPVA para veículos híbridos e elétricos, como Alagoas, Distrito Federal, Maranhão, Paraná, Rio de Janeiro e São Paulo. Em São Paulo, por exemplo, a utilização de veículos elétricos e híbridos é também incentivada excluindo esses veículos do rodízio municipal (SÃO PAULO, 2014). Apesar dos incentivos relativamente leves, o crescimento na venda de veículos elétricos e híbridos no Brasil é significativo. Em 2022, ultrapassou as 48 mil unidades (Figura 19).

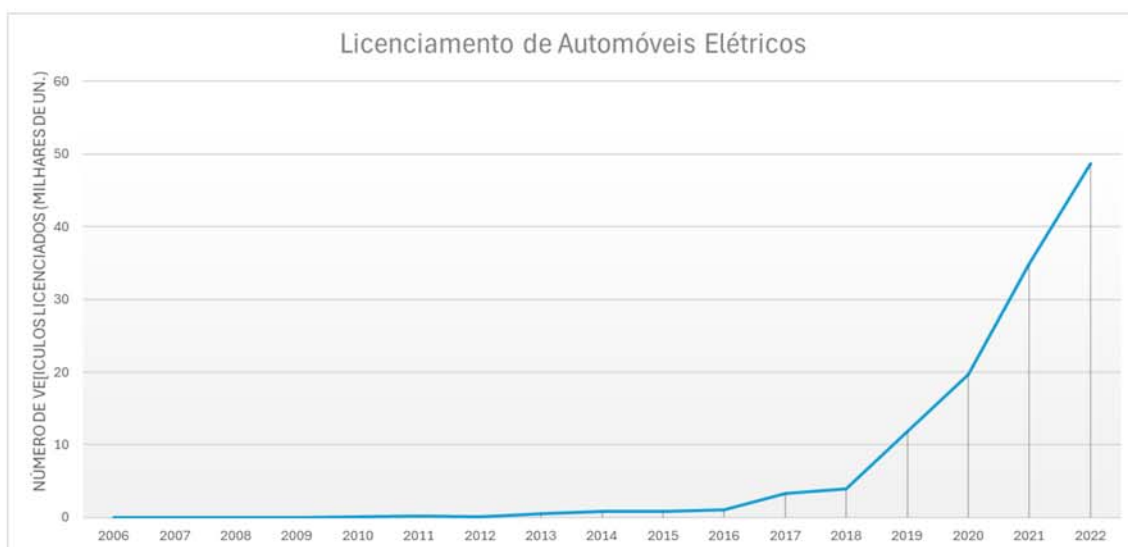


Figura 19 – Licenciamento de veículos elétricos no Brasil. Percebe-se crescimento expressivo. Elaboração própria com dados de ANFAVEA, 2023.

A análise das questões climáticas levantadas, aliada à dependência brasileira do diesel importado, à experiência nacional com a fabricação e comercialização de veículos alimentados com etanol e à tendência mundial de crescimento do mercado de veículos híbridos e elétricos, impulsionam o estudo de alternativas sustentáveis que visem mitigar impactos e utilizem o potencial de desenvolvimento disponível no país. O Brasil já possui

alternativa com emissões reduzidas para veículos leves: o etanol. Com isso, a barreira de entrada para veículos eletrificados nesse segmento é dificultada. Por outro lado, a eletrificação de veículos pesados mostra-se como oportunidade relevante para descarbonização do setor de transportes ao mesmo tempo em que promove a transição e segurança energéticas.

Assim, percebe-se que a concepção de um sistema de extensão de autonomia alimentado a etanol para veículos pesados eletrificados promove aumento na segurança energética do país, pois tem potencial para diminuir a importação de diesel estrangeiro em prol da utilização do biocombustível fabricado em território nacional. Ao mesmo tempo, essa substituição destaca os benefícios do veículo eletrificado, como redução de emissões, poluentes atmosféricos e ruídos, simplificação no número de componentes e diminuição de custos com manutenção.

Capítulo 4

4. Metodologia

A metodologia para o desenvolvimento do sistema aqui proposto compreende as etapas de delimitação de escopos, concepção do sistema de geração de energia, *design* do CESE-Etanol, Fabricação do CESE-Etanol e Elaboração de Experimentos.

4.1. Delimitação de Escopos

Considerando os objetivos gerais e específicos, o aparato experimental disponível e a lacuna no preenchimento que a tese visa preencher, foram delimitados os escopos do sistema a ser desenvolvido e da tese de doutorado.

Para o desenvolvimento do sistema e subsequentes procedimentos experimentais, foi considerado que a potência disponível pelo sistema precisa ser, pelo menos, equivalente à potência média fornecida pelas baterias para um veículo do tipo ônibus urbano eletrificado, estipulada em torno de 36,4 kW (DE MIRANDA, P E V, CARREIRA, *et al.*, 2017). Contudo, nota-se que esse é um limite inferior e o aumento da potência instantânea do sistema, sem prejuízos para a sua eficiência energética, é vantajoso para a operação, uma vez que o sistema de extensão de autonomia pode funcionar por menor período.

Para emissões, foram consideradas CO₂, CO, HC, NO_x e MP. Veículos a diesel costumemente também emitem SO_x e outros compostos em porcentagens menores. Porém, o aparato experimental para mensuração de emissões disponível não apresentava a capacidade de medir SO_x. O quantitativo de SO_x evitado pode ser estimado como o total de SO_x emitido por veículos convencionais do tipo diesel disponível na literatura, uma vez que a queima do etanol não os emite. Apesar do procedimento teórico levar em conta o NO_x, o aparato experimental para medição de emissões também não disponibilizava essas informações.

4.2. Concepção do sistema de geração de energia

O equipamento aqui proposto foi denominado Conversor de Energia Seguidor de Eficiência a Etanol (CESE-Etanol) e teve suas concepções teóricas e os primeiros experimentos práticos no processo de desenvolvimento dos projetos FAPERJ nº E-26 / 190.067/2008, Projeto Ônibus PD-0394-1250/2012, Projeto “Desenvolvimento e Testes com Embarcações com Tração Elétrica” PD-0394-1249/2012 e o Projeto “Tecnologia Nacional de Transporte Sustentável para Maricá: Desenvolvimento e Operação Assistida Fase 1” PET-23679/2021 – ICTIM 17/2021, realizados pelo Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ (LabH2 - depósito de patente BR1020190209739, DE MIRANDA, CARREIRA, DA SILVA , 2019). A denominação CESE-Etanol nasceu devido às características de concepção da máquina e do veículo no qual é instalado, em modo em série, que permitem que funcione em ponto de melhor eficiência na conversão da energia do etanol em energia elétrica, independente de parâmetros como velocidade linear do veículo em que é instalado e potência instantânea produzida. Isso é obtido, além de através do aumento da eficiência do CESE-Etanol, pela engenharia de hibridização do

ônibus híbrido elétrico etanol. Tal veículo foi idealizado para disponibilizar potência instantânea majoritariamente através de baterias e energia majoritariamente através do combustível. Dessa maneira, as baterias são responsáveis por atuar os picos de potência solicitados pelo veículo, permitindo a operação do CESE-Etanol em regime majoritariamente estacionário. Tal fato também tem como resultado a redução do custo de operação do conjunto e as emissões na sua utilização.

O CESE-Etanol é uma máquina versátil, que pode ser utilizada para produção de energia elétrica em modo estacionário, como um motor gerador, ou ainda em modo embarcado em veículos eletrificados, como ônibus, caminhões, trens e embarcações.

Desde sua primeira versão, o CESE-Etanol passou por diversas interações, visando redução de peso, volume e aumento de eficiência. Dentre esses desenvolvimentos, foi alterado a disposição dos equipamentos, o MCI e o gerador utilizados e as opções de controle do sistema. Durante o período que compreende esse curso de doutorado, o CESE-Etanol em sua quinta interação foi projetado e foi dado início a novas fabricações levando em consideração a eficiência energética e as emissões do conjunto. Esse sistema está presente em um depósito de patente BR1020190209739 (DE MIRANDA, CARREIRA, DA SILVA , 2019).

4.3. Design do CESE-Etanol

No âmbito do projeto PD-0394-1249/2012, o sistema foi projetado pelo Laboratório de Hidrogênio da Coppe/UFRJ, que atuou em conjunto com as empresas ProTune e Dacar Motorsports na seleção de MCIs compatíveis com a atividade e montagem das estruturas e sistemas auxiliares necessários à operação, tendo em vista a maior eficiência dinâmica do conjunto e a sua adaptabilidade para funcionamento em veículos e em modo estacionário.

O CESE-Etanol é composto por um conjunto motor-gerador, que utiliza MCI de ciclo Otto, adaptado para utilização com etanol e um motor elétrico operando em modo gerador, além de sistemas auxiliares. Os sistemas auxiliares podem ser divididos em sistema de refrigeração do MCI, sistema de refrigeração do gerador e sistemas de controle.

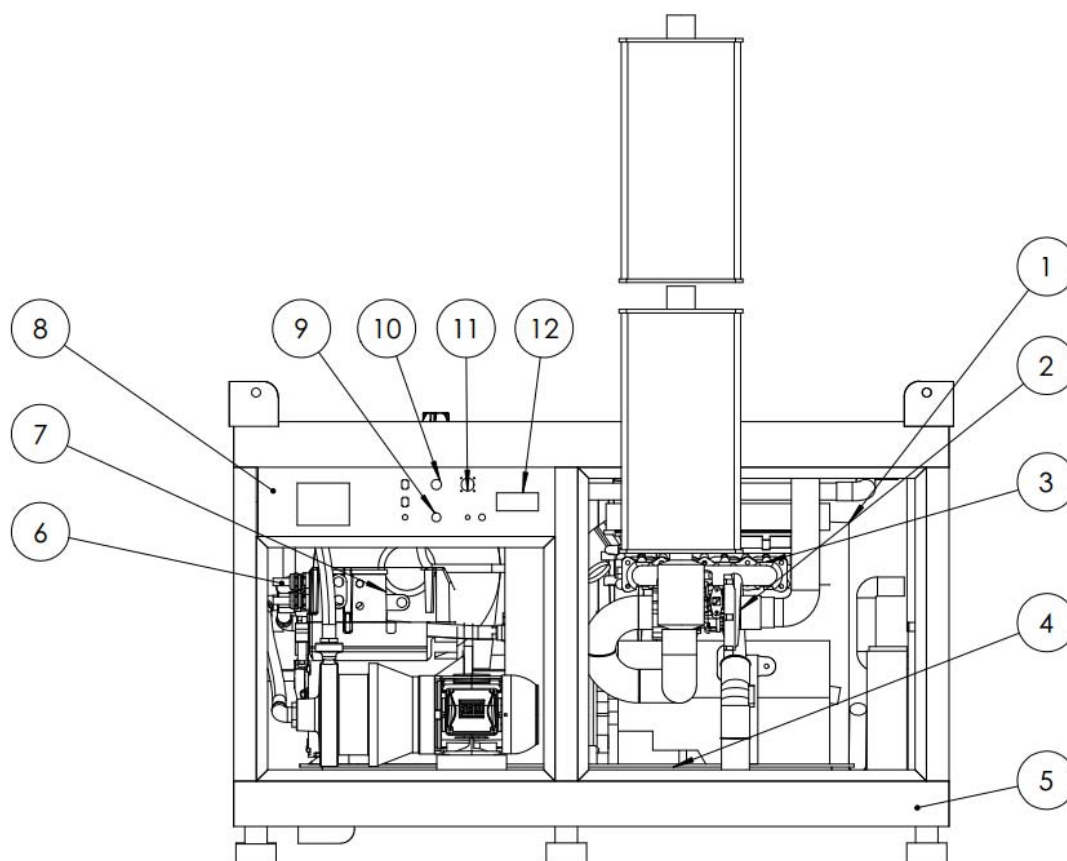
O modelo de MCI foi selecionado levando em consideração os requisitos de rotação e torque para a aplicação em potência nominal, ao mesmo tempo em que é um modelo leve e eficiente em relação a outras opções de mercado. Esse motor era, originalmente, projetado para operação com gasolina. Dessa forma, foram feitas adaptações para sua utilização com etanol, incluindo a adoção de um turbo compressor e a parametrização do módulo de controle. O turbo compressor foi desenvolvido de forma personalizada para aumentar a compressão total no ciclo em função da utilização com etanol, permitindo maior eficiência e maior produção de torque em menores rotações, sem comprometer a vida útil do equipamento.

O motor elétrico escolhido para operar como gerador foi fruto de pesquisa de mercado com parâmetros como eficiência, peso, tensões nominais e potência nominal. Uma característica que dificultou a escolha do motor elétrico foi a temperatura de operação. Os modelos disponíveis no mercado geralmente funcionam com limites baixos de temperatura ambiente, até 40°C, fato que os inviabilizava para operação no Rio de Janeiro. As outras opções com limites de operação acima de 40°C, incluindo opções nacionais, foram inviabilizadas, geralmente pelo peso do equipamento ou pela rotação nominal.

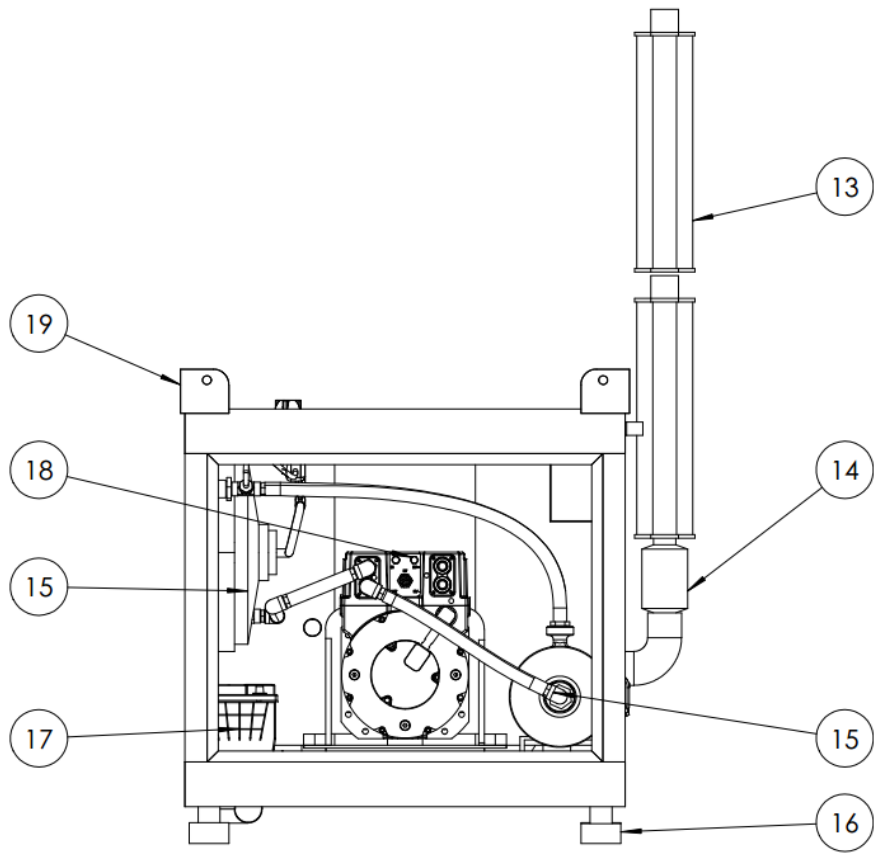
4.4. Fabricação do CESE-Etanol

As fabricações do CESE-Etanol tiveram por objetivo montar um protótipo para operação em modo estacionário a fim de realizar os testes experimentais.

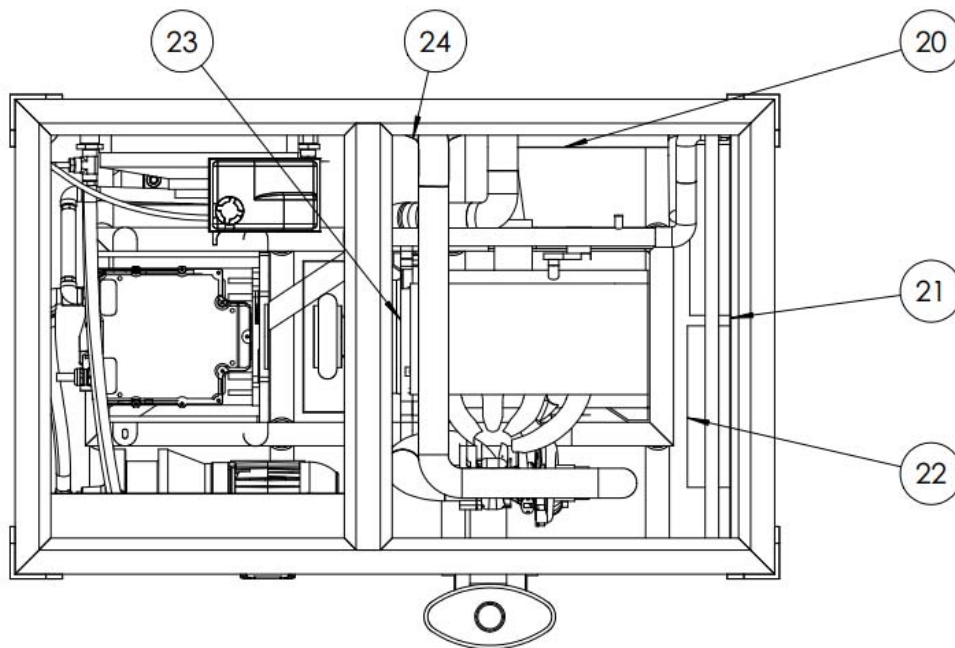
Na Figura 20, a, b e c, são mostradas vistas frontal, lateral e superior do projeto de arranjo do CESE-Etanol com seus componentes principais. O projeto e a fabricação de tal sistema foram objeto de desenvolvimentos incrementais, de modo que frequentes melhoramentos são propostos conforme resultados dos testes, que implicam em novos projetos e fabricações.



(a)



(b)



(c)

Figura 20 – Projeto de arranjo do CESE-Etanol com os principais componentes.

Onde:

- 1- Motor a combustão interna de ciclo Otto;
- 2- Sistema de turbo compressor customizado;
- 3- Coletor de escape do MCI;
- 4- Estrutura interna de suporte do conjunto MCI-Gerador, isolada eletricamente da estrutura externa e com atenuação de vibrações através de coxins;
- 5- Estrutura externa em modo estacionário;
- 6- Saída de potência;
- 7- Motor elétrico em modo gerador;
- 8- Interface homem-máquina (IHM);
- 9- Botão de desligamento de emergência físico;
- 10- Conexão de desligamento de emergência remoto;
- 11- Admissão de combustível;

- 12- Painel de fusíveis;
- 13- Conjunto de silenciosos em modo estacionário;
- 14- Catalisador;
- 15- Sistema de refrigeração do gerador;
- 16- Coxins de apoio em modo estacionário;
- 17- Bateria auxiliar;
- 18- I/O de controle do gerador;
- 19- Estruturas de fixação do sistema;
- 20- Intercooler do turbo compressor;
- 21- Radiador do sistema de refrigeração do MCI;
- 22- Ventoinhas do sistema de refrigeração do MCI;
- 23- Acoplamento flexível entre o MCI e o motor elétrico;
- 24- Admissão de ar.

As Figura 21 e Figura 22 apresentam renderizações do CESE-Etanol em vista em perspectiva nos modos estacionário e embarcado. A Figura 23 apresenta registro fotográfico do CESE-Etanol em modo estacionário.



Figura 21 – Renderização do sistema CESE-Etanol em vista em perspectiva, em modo estacionário



Figura 22 - Renderização do sistema CESE-Etanol em vista em perspectiva, em modo embarcado



Figura 23 – Registro fotográfico do CESE-Etanol fabricado em modo estacionário

(Fonte: Elaboração própria)

4.5. Elaboração de Experimento

O experimento foi idealizado de modo a analisar o desempenho e as emissões do CESE-Etanol. A Figura 24 apresenta os principais componentes da montagem de experimento. Os experimentos realizados no CESE-Etanol foram feitos com ele em modo estacionário.

Para tal, o CESE-Etanol foi conectado a um banco de baterias (Figura 24 – item 8) e operado de modo a produzir energia elétrica através da combustão do etanol presente em um tanque de combustível (Figura 24 – item 3) posicionado em cima de uma balança. O consumo do combustível no ponto de operação também foi medido através de um medidor de fluxo (Figura 24 – item 4) presente na linha de alimentação de combustível do CESE-Etanol. Um analisador de gases do tipo Alfatest Discovery G (Tabela 5) foi utilizado para medir emissões de CO, HC e CO₂ em porcentagem volumétrica em base seca, em derivação anterior ao catalisador, de modo a obter valor mais significativo para o motor. O equipamento utilizado não tinha capacidade para medição de NO_x.

Tabela 5 – Especificações do Analisador de Gases Alfatest Discovery G4

Especificações do Analisador de Gases	
Parâmetro	Especificação
Modelo	Alfatest Discovery G4
Limites de RPM	0 → 9999
Medição de HC	0 → 2000 ppm vol (Hexano) 0 → 4000 ppm vol (Propano)
Medição de CO	0 → 15% vol
Medição de CO ₂	0 → 20% vo
Medição de O ₂	0 → 25% vol
Medição de NO _x	Não disponível

Os parâmetros do MCI (Figura 24 – item 5), do gerador (Figura 24 – item 8), da balança e do analisador de gases foram colhidos por computador para posterior análise através de, respectivamente, interface do módulo de controle do MCI, interface do módulo de controle do gerador, captura de imagem da balança através de uma câmera e captura de tela dos resultados do analisador de gases.

A Figura 25 apresenta registro fotográfico do CESE-Etanol (equipamento azul) montado em cavalete em modo estacionário e aparatos experimentais durante medições.

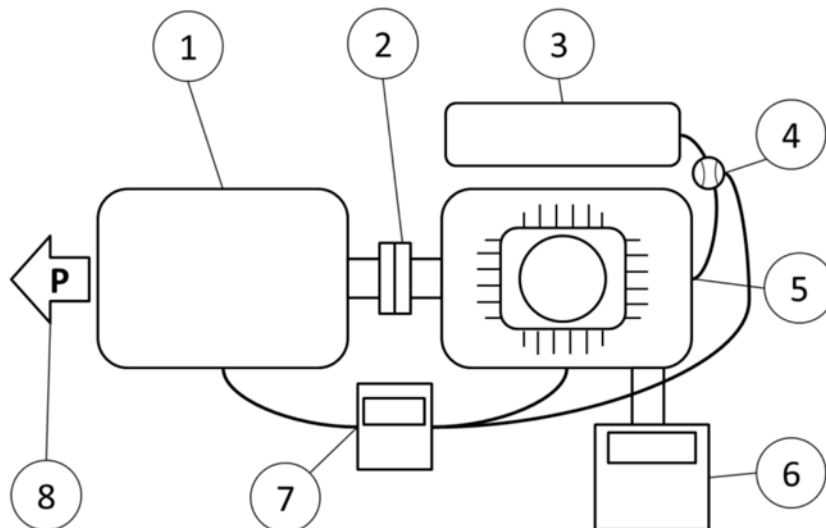


Figura 24 – Aparato experimental para realização de testes de desempenho e emissões CESE-Etanol (Fonte: Elaboração própria).

Onde,

- 1- Motor elétrico em modo gerador
- 2- Acoplamento flexível
- 3- Tanque de combustível (etanol) com balança
- 4- Medidor de fluxo de combustível
- 5- MCI
- 6- Analisador de gases
- 7- Laptop com integração de sistemas
- 8- *Output* de energia em banco de baterias



Figura 25 – Fotografia da montagem do aparato experimental para medições no CESE-Etanol em modo estacionário (Fonte: Elaboração própria).

4.6. Análise Estatística

Após a fabricação e montagem do sistema em modo estacionário, foram realizados testes de desempenho e emissões a fim de quantificar o consumo, potência, autonomia, emissões de gases de efeito estufa e poluentes atmosféricos, manejo térmico do sistema, dentre outros.

Foram selecionados quatro pontos de operação, correspondentes a 25%, 50%, 75% e 100% da potência nominal do conjunto. Antes das medições em cada ponto de operação, o sistema permaneceu aproximadamente nas mesmas condições de geração por pelo menos 20 minutos, a fim de reduzir efeitos de transientes nos valores encontrados. O fator lambda da mistura ar combustível foi mantido, em circuito fechado através da sonda lambda, o mais próximo possível de 1, ou seja, mistura estequiométrica.

Foram realizadas até 11 medições para cada ponto de operação e calculados médias (\bar{x}) (Equação 4), desvios padrão da amostra e incertezas tipo A do conjunto de medições.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i \quad \text{Eq. 4}$$

Onde \bar{x} representa a média e n representa o número de valores na amostra.

O Desvio Padrão da amostra quantifica a dispersão dos dados em relação à média, indicando o quão espalhado está o conjunto de dados. O Desvio Padrão é calculado através da Equação 4, Equação 5 e Equação 6.

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad \text{Eq. 5}$$

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad \text{Eq. 6}$$

Onde σ^2 representa a variância e σ representa o desvio padrão.

A Incerteza do Tipo A reflete a precisão da medição com base na incerteza obtida através de repetidas medições da mesma grandeza, em série. A Incerteza Tipo A é calculada através da Equação 7.

$$u_A = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde u_A representa a Incerteza Padrão Tipo A.

Capítulo 5

5. Resultados

Essa etapa apresenta os resultados experimentais dos testes de desempenho e de emissões do CESE-Etanol operando em modo estacionário.

5.1. Testes do CESE-Etanol em modo estacionário

5.1.1. Teste de Desempenho

Para o teste de desempenho, em cada ponto, foram medidas as potências elétrica e mecânica, a potência consumida para o balanço de planta (BdP), temperaturas no gerador e no motor, consumos no ponto de operação através de fluxímetro e de balança calibrada, além de outros dados de menor significância. No balanço de planta estão inclusos todos os consumos dos sistemas auxiliares ao funcionamento do CESE-Etanol. Os dados de consumo através da balança foram obtidos por câmera direcionada ao mostrador da balança, com captura em intervalos calibrados. Através desses parâmetros, foi possível encontrar o consumo específico de combustível do motor (Equação 8) e do conjunto (Equação 9), a eficiência térmica na conversão do combustível (Equação 10), assim como a eficiência total do conjunto na conversão da energia do combustível em energia elétrica (Equação 11).

$$SFC_{motor} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{\dot{m} \left[\frac{g}{s} \right] * 3600}{P [kW]} \quad \text{Eq. 8}$$

Onde SFC_{motor} representa o consumo específico de combustível no motor, \dot{m} representa o consumo de combustível no ponto de operação e P representa a potência no eixo do motor no momento da medição.

$$SFC_{conjunto} \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{\dot{m} \left[\frac{g}{s} \right] * 3600}{P_{e.ef} [kW]} \quad \text{Eq. 9}$$

Onde $P_{e.ef}$ representa a potência elétrica efetiva produzida pelo conjunto, ou seja, a potência mecânica produzida pelo MCI, transformada em potência elétrica produzida pelo gerador, decrescida da potência elétrica necessária para o balanço de planta.

$$\eta_{motor} = \frac{1000}{SFC_{motor} \left[\frac{g}{kWh} \right]} * \frac{1}{PCI_{etanol\ hidr.} \left[\frac{kWh}{kg} \right]} * 100 \quad \text{Eq. 10}$$

Onde η_{motor} representa a eficiência térmica na conversão da energia do combustível pelo motor e $PCI_{etanol\ hidr.}$ representa o poder calorífico inferior do etanol hidratado.

$$\eta_{conjunto} = \frac{1000}{SFC_{conjunto} \left[\frac{g}{kWh} \right]} * \frac{1}{PCI_{etanol\ hidr.} \left[\frac{kWh}{kg} \right]} * 100 \quad \text{Eq. 11}$$

Onde $\eta_{conjunto}$ representa a eficiência na conversão da energia do combustível em energia elétrica para recarga das baterias.

As Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9 apresentam os principais parâmetros medidos no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, bem como os parâmetros calculados, em médias, desvios padrão de amostra e incertezas tipo A.

Tabela 6 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 25% de carga.

25% de carga	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão	Incerteza Tipo A
	Temperatura no Dissipador do Gerador	°C	42	0,00	0,00
	Temperatura do Motor	°C	83,35	1,71	0,52
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	L/h	13,75	0,62	0,19
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	g/s	3,05	0,14	0,04
	Consumo instantâneo (balança)	g/s	3,10	0,52	0,16
	Consumo Específico de Combustível no Motor	g/kWh _{eixo}	587,64	19,67	5,93
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	645,97	36,92	11,13
	Eficiência Térmica na Conversão do Combustível	%	23,93	0,87	0,26
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	21,80	1,15	0,35

Tabela 7 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 50% de carga.

50% de carga	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão (Amostra)	Incerteza Tipo A
	Temperatura no Dissipador do Gerador	°C	46	0,00	0,00
	Temperatura do Motor	°C	83,62	1,61	0,49
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	L/h	22,25	0,20	0,06
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	g/s	4,94	0,04	0,01
	Consumo instantâneo (balança)	g/s	4,97	0,11	0,03
	Consumo Específico de Combustível no Motor	g/kWh _{eixo}	470,31	9,21	2,78
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	509,50	4,51	1,36
	Eficiência Térmica na Conversão do Combustível	%	29,87	0,57	0,17
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	27,57	0,25	0,07

Tabela 8 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 75% de carga.

75% de carga	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão (Amostra)	Incerteza Tipo A
	Temperatura no Dissipador do Gerador	°C	52,364	0,81	0,24
	Temperatura do Motor	°C	84,17	1,27	0,38
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	L/h	31,05	0,28	0,08
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	g/s	6,90	0,06	0,02
	Consumo instantâneo (balança)	g/s	6,85	0,14	0,05
	Consumo Específico de Combustível no Motor	g/kWh _{eixo}	447,76	9,53	2,87
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	470,92	6,73	2,03
	Eficiência Térmica na Conversão do Combustível	%	31,38	0,66	0,20
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	29,83	0,42	0,13

Tabela 9 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de desempenho do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 100% de carga.

100% de carga	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão	Incerteza Tipo A
	Temperatura no Dissipador do Gerador	°C	49,091	1,04	0,31
	Temperatura do Motor	°C	83,92	1,63	0,49
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	L/h	42,35	0,35	0,11
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	g/s	9,40	0,08	0,02
	Consumo instantâneo (balança)	g/s	9,36	0,42	0,16
	Consumo Específico de Combustível no Motor	g/kWh _{eixo}	456,41	4,88	1,47
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	478,77	4,99	1,51
	Eficiência Térmica na Conversão do Combustível	%	30,78	0,33	0,10
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	29,34	0,30	0,09

Percebe-se que os consumos no ponto de operação medidos pelo fluxímetro e pela balança são muito próximos. Dessa forma, foram utilizadas as medidas do fluxímetro para os cálculos tendo em vista menor desvio padrão e incerteza tipo A.

5.1.2. Testes de Emissões

O teste de emissões foi realizado em concomitância com o teste de desempenho. Dessa forma, os pontos medidos foram em 25% de plena carga, 50% de plena carga, 75% de plena carga e 100% de plena carga. O analisador de gases, Alfatest Discovery G, foi montado em derivação dos gases de escape em local pré-catalisador do tipo de três vias, de modo a medir as emissões diretas do motor, antes das reações de oxidação e redução que ocorrem no catalisador. O gás de escape foi medido em base seca.

A Equação 12 (TIWARI, RAJ, *et al.*, 2021) foi utilizada para o cálculo da emissão específica, tanto para análise no eixo do motor, quanto na saída de energia elétrica para as baterias, ou seja, para todo o conjunto do CESE-Etanol, considerando a eficiência do gerador e o balanço de planta.

$$XY \left[\frac{g}{kWh} \right] = \frac{XY [ppm] * 10^{-6} * \dot{m}_{esc} * MW_{XY} \left[\frac{g}{mol} \right]}{P [kW] * MW_{esc} \left[\frac{g}{mol} \right]} \quad \text{Eq. 12}$$

Onde:

XY representa o composto químico gás de efeito estufa ou poluidor atmosférico;

\dot{m}_{esc} representa a vazão mássica no escapamento em base seca;

MW_{XY} representa a massa molar do composto XY;

P representa a potência instantânea, mecânica no eixo do motor ou elétrica na saída do sistema CESE-Etanol.

MW_{esc} representa a massa molar dos gases de escape.

O fator de conversão presente na Equação 13 foi utilizado para conversão de porcentagem para ppm, quando necessário.

$$10.000 \text{ ppm} = 1\% \quad \text{Eq. 13}$$

A razão ar-combustível, AFR, representa a quantidade de ar, em massa, que é necessária para a combustão de um combustível específico. A razão entre AFR e AFR em condições estequiométricas é chamada de lambda (λ), AFR_{estq} , conforme mostrado na Equação 14.

$$\lambda = \frac{AFR}{AFR_{estq}} \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

λ representa o fator lambda da operação,

AFR representa a razão entre ar e combustível admitidos na operação, e

AFR_{estq} representa a razão entre ar e combustível para a queima em razões estequiométricas.

Quando o λ da reação é igual a 1, como no teste realizado, para o caso do etanol $AFR=AFR_{estq} = 9$ (POURKHESALIAN, SHAMEKHI, et al., 2010). Isso significa que,

para cada 1 parte em massa de etanol na combustão, são necessárias 9 partes em massa de ar.

O etanol hidratado, contém, no mínimo 94,5 %vol de etanol e 5,5%vol de água (ANP, 2022). Convertendo para base mássica, percebe-se que as porcentagens são 92,5%massa de etanol e 7,5%massa de água. Dessa forma, apenas 92,5% da massa do combustível admitido é, de fato, etanol.

Dessa forma, pela conservação de massas, a vazão mássica instantânea no escapamento, em base seca, pode ser representada pela Equação 15.

$$\dot{m}_{esc} = 0,925 * \dot{m} + 9 * 0,925 * \dot{m} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

\dot{m}_{esc} representa o fluxo mássico no escapamento, e

\dot{m} representa o fluxo mássico de combustível injetado.

Os compostos presentes no escapamento são CO₂, CO, HC, NO_x e O₂. Desses compostos, CO₂, CO e HC foram medidos pelo analisador de gases, enquanto a sonda lambda do motor mediu as emissões de O₂. O aparato de testes não dispunha de capacidade para medição de NO_x. Uma vez que se espera, pela análise teórica, percentual de emissões de NO_x com significância muito baixa em relação ao total (uma ordem de grandeza menor que o CO, por exemplo) admitiu-se para os cálculos, como forma de simplificação, que toda a emissão de nitrogênio no gás de escapamento está presente na forma de N₂ no escapamento. Pela análise de sensibilidade, essa simplificação insere um erro de até 0,04% na massa dos gases de exaustão, sendo, portanto, desconsiderada. Também como forma de simplificação, admitiu-se que todo hidrocarboneto não queimado presente na mistura possui a massa molar do etanol. Pela análise de sensibilidade, essa simplificação apresenta variações na massa dos gases do escapamento

de até 0,003%, sendo, portanto, desconsiderada. Assim, a Tabela 10 apresenta os compostos presentes no escapamento e a respectiva massa molar.

Tabela 10 – Massas molares dos compostos presentes no escapamento.

Compostos presentes no escapamento com respectiva massa molar	
Composto	Massa molar [g/mol]
CO ₂	44,01
CO	28,01
HC (simplificado para C ₂ H ₅ OH)	46,07
NOx (simplificado para N ₂)	28,02
O ₂	32,00

Assim, através da Equação 16, é possível calcular a massa molar do gás de escapamento, MW_{esc} .

$$MW_{esc} = \sum_{i=1}^n m_i \%_m * MW_{XYi} \left[\frac{g}{mol} \right] \quad \text{Eq. 16}$$

Onde:

$m_i \%_m$ representa a fração mássica do composto i na mistura, e

MW_{XYi} representa a massa molar do composto i na mistura.

Dessa forma, as Tabela 11,

Tabela 12,

Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os principais parâmetros medidos no teste de emissões do CESE-Etanol operando em modo estacionário, bem como os parâmetros calculados, em médias, desvios padrão de amostra e incertezas tipo A.

Tabela 11 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 25% de carga.

25% de carga (Pré-Catalisador)	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão	Incerteza Tipo A
	Vazão Mássica no Escapamento (base seca)	g/h	101700	4586	1383
	Emissão de CO ₂	%	14,28	0,10	0,03
	Emissão de CO	%	0,27	0,03	0,01
	Emissão de HC	ppm	29,73	0,79	0,24
	Emissão de O ₂	%	0,30	0,06	0,02
	Massa Molar dos Gases da Exaustão	g/Mol	30,30	0,02	0,005
	Emissão Específica de CO ₂ do motor	g/kWh _{elixo}	1127,57	41,34	12,47
	Emissão Específica de CO do motor	g/kWh _{elixo}	13,76	1,48	0,45
	Emissão Específica de HC do motor	g/kWh _{elixo}	0,09	0,004	0,001
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	1163,80	63,05	19,01
	Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	14,16	1,19	0,36
	Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,09	0,01	0,002

Tabela 12 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 50% de carga.

50% de carga (Pré-Catalisador)	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão (Amostra)	Incerteza Tipo A
	Vazão Mássica no Escapamento (base seca)	g/h	164480	1455	439
	Emissão de CO ₂	%	14,70	0,000	0,000
	Emissão de CO	%	0,28	0,02	0,01
	Emissão de HC	ppm	50,91	9,72	2,93
	Emissão de O ₂	%	0,34	0,01	0,004
	Massa Molar dos Gases da Exaustão	g/Mol	30,36	0,001	0,000
	Emissão Específica de CO ₂ do motor	g/kWh _{elixo}	926,66	18,15	5,47
	Emissão Específica de CO do motor	g/kWh _{elixo}	11,32	0,92	0,28
	Emissão Específica de HC do motor	g/kWh _{elixo}	0,12	0,02	0,01
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	973,22	8,61	2,60
	Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	11,87	0,76	0,23
	Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,12	0,02	0,01

Tabela 13 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 75% de carga.

75% de carga (Pré-Catalisador)	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão (Amostra)	Incerteza Tipo A
	Consumo Instantâneo (fluxímetro - etanol anidro)	g/h	22961	205	62
	Vazão Mássica no Escapamento (base seca)	g/h	229614	2048	618
	Emissão de CO ₂	%	14,51	0,03	0,01
	Emissão de CO	%	0,35	0,01	0,003
	Emissão de HC	ppm	95,18	0,87	0,26
	Emissão de O ₂	%	0,35	0,02	0,01
	Massa Molar dos Gases da Exaustão	g/Mol	30,33	0,01	0,002
	Emissão Específica de CO ₂ do motor	g/kWh _{elítrico}	871,66	18,31	5,52
	Emissão Específica de CO do motor	g/kWh _{elítrico}	13,49	0,60	0,18
	Emissão Específica de HC do motor	g/kWh _{elítrico}	0,21	0,005	0,001
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	898,02	14,07	4,24
	Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	13,89	0,52	0,16
	Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,21	0,004	0,001

Tabela 14 – Principais parâmetros medidos e calculados no teste de emissões pré-catalisador do CESE-Etanol operando em modo estacionário, 100% de carga.

100% de carga (Pré-Catalisador)	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão	Incerteza Tipo A
	Consumo Instantâneo (fluxímetro - etanol anidro)	g/h	31316	259	78
	Vazão Mássica no Escapamento (base seca)	g/h	313165	2590	781
	Emissão de CO ₂	%	13,88	0,04	0,01
	Emissão de CO	%	0,78	0,01	0,003
	Emissão de HC	ppm	144,64	7,32	2,21
	Emissão de O ₂	%	0,37	0,02	0,01
	Massa Molar dos Gases da Exaustão	g/Mol	30,23	0,01	0,002
	Emissão Específica de CO ₂ do motor	g/kWh _{elítrico}	852,94	9,28	2,80
	Emissão Específica de CO do motor	g/kWh _{elítrico}	30,50	0,42	0,13
	Emissão Específica de HC do motor	g/kWh _{elítrico}	0,32	0,02	0,01
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	881,00	8,33	2,51
	Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	31,50	0,56	0,17
	Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,33	0,02	0,01

5.1.3. Operação em campo

Após os testes em modo estacionário, o CESE-Etanol foi utilizado para recarregar o Ônibus Híbrido Elétrico-Hidrogênio da Coppe/UFRJ durante trajetos de longa distância em locais remotos, conforme registro fotográfico da Figura 26.



Figura 26 – Ônibus Híbrido Elétrico Hidrogênio sendo recarregado pelo CESE-Etanol em um teste de campo. (Fonte da Imagem: Adaptado de COPPETEC, 2018)

5.2. Compilação de Resultados e Tratamento de Dados

Pelos resultados, percebe-se que a potência de operação com maior eficiência e menor conjunto de emissões é em 75% de carga, consolidados na Tabela 15.

Tabela 15 – Melhores condições de operação para economia de combustível e redução de emissões com emissões pré-catalisador, referentes ao CESE-Etanol operando em modo estacionário com 75% de carga.

	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio	Incerteza Tipo
				Padrão (Amostra)	A
75% de carga (Pré-Catalisador)	Temperatura no Dissipador do Gerador	°C	52,364	0,81	0,24
	Temperatura do Motor	°C	84,17	1,27	0,38
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	L/h	31,05	0,28	0,08
	Consumo instantâneo (fluxímetro)	g/s	6,90	0,06	0,02
	Consumo instantâneo (balança)	g/s	6,85	0,14	0,05
	Consumo Específico de Combustível no Motor	g/kWh _{eixo}	447,76	9,53	2,87
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	470,92	6,73	2,03
	Eficiência Térmica na Conversão do Combustível	%	31,38	0,66	0,20
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	29,83	0,42	0,13
	Consumo Instantâneo (fluxímetro - etanol anidro)	g/h	31316	259	78
	Vazão Mássica no Escapamento (base seca)	g/h	313165	2590	781
	Emissão de CO ₂	%	13,88	0,04	0,01
	Emissão de CO	%	0,78	0,01	0,003
	Emissão de HC	ppm	144,64	7,32	2,21
	Emissão de O ₂	%	0,37	0,02	0,01
	Massa Molar dos Gases da Exaustão	g/Mol	30,23	0,01	0,002
	Emissão Específica de CO ₂ do motor	g/kWh _{eixo}	852,94	9,28	2,80
	Emissão Específica de CO do motor	g/kWh _{eixo}	30,50	0,42	0,13
	Emissão Específica de HC do motor	g/kWh _{eixo}	0,32	0,02	0,01
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	881,00	8,33	2,51
Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	31,50	0,56	0,17	
Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,33	0,02	0,01	

E as Figura 27 e Figura 28 (a, b e c) apresentam os consolidados de emissões de CO₂, CO e HC para os quatro pontos de medição, 25%, 50%, 75% e 100%.

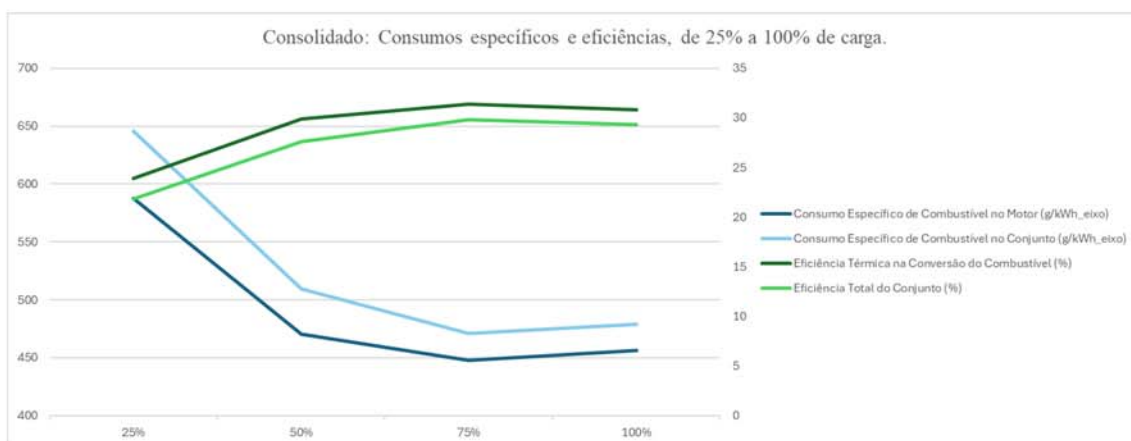
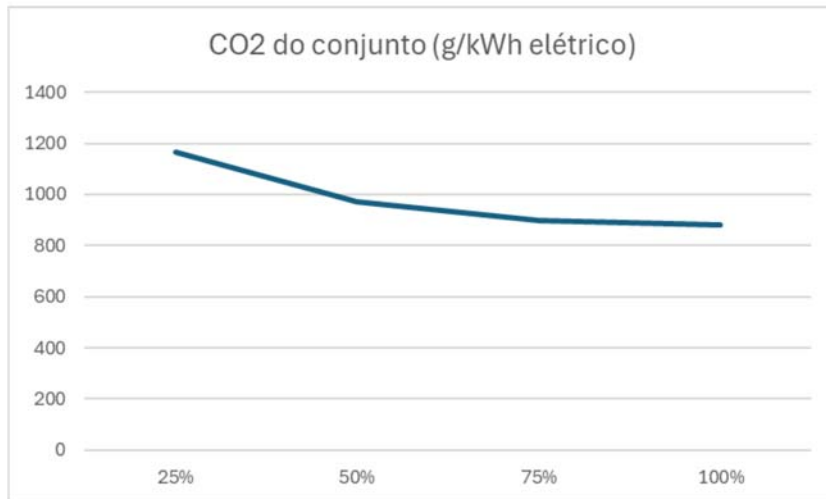
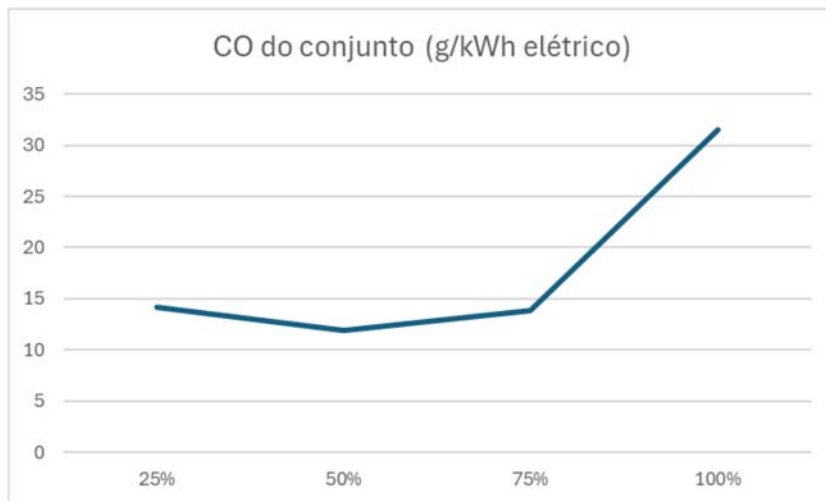


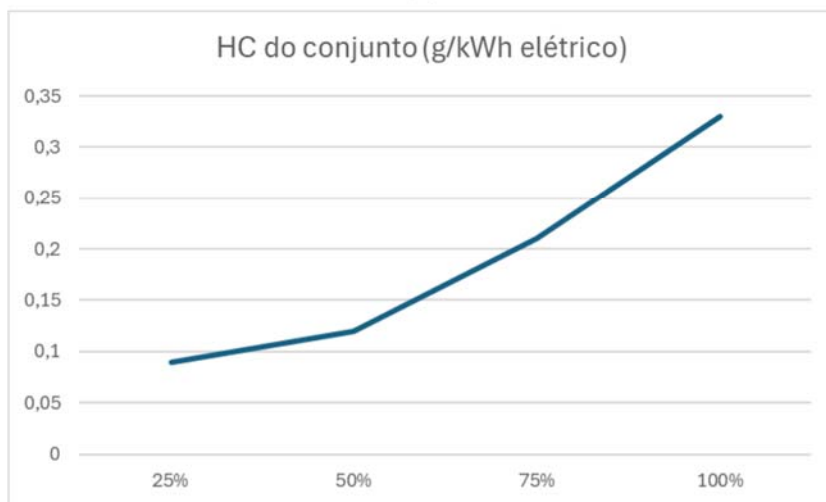
Figura 27 – Comparação entre consumos específicos e eficiências nos quatro pontos de operação, 25%, 50%, 75% e 100%.



(a)



(b)



(c)

Figura 28 – Consolidado de emissões experimentais pré-catalisador para CO₂, CO e HC, nos quatro pontos de operação, 25%, 50%, 75% e 100%.

Dentre o conjunto de pontos selecionados, o que apresentou resultados menos expressivos quanto a economia de combustível e inventário de emissões foi o de 25% de carga. Em 25% de carga, o aumento do consumo específico em relação à operação em 75% de carga é de até 8,2%, enquanto o aumento nas emissões em relação à operação em 75% de carga é de 26,6% para o CO₂ e 1,02% para CO. Para o HC, há redução nas emissões em 25% de carga em relação a todos os cenários. Em relação a 75% de carga, essa redução é de aproximadamente 60%. Ressalta-se a diferença em ordem de magnitude das emissões de HC em relação aos demais poluentes. Uma possível explicação para o aumento no consumo específico em 25% de carga é a maior magnitude da influência do consumo dos sistemas auxiliares do balanço de planta em relação ao total.

Capítulo 6

6. Discussões

A etapa de Discussões é dividida em Validação Teórica e Validação Experimental. No processo de validação teórica, os consumos, custos e emissões são buscados na literatura e, a partir deles, é traçado um paralelo para a substituição do ônibus urbano convencional a diesel por ônibus híbrido a etanol. Na validação experimental, os dados medidos através do CESE-Etanol são introduzidos para extrapolação e comparação com a análise teórica a fim de validar a viabilidade do sistema aqui proposto.

6.1. Validação teórica

O processo de validação teórica busca validar premissas iniciais e buscar entender a dinâmica dos processos, com base em análise da literatura. Devido à dificuldade em encontrar trabalhos similares na literatura, o processo de análise teórica compara emissões em veículos convencionais a diesel e emissões em veículos eletrificados com motores convencionais do tipo Otto operando com etanol. A validação foi dividida em aspectos gerais e particulares.

Como aspecto geral, enuncia-se a influência positiva da substituição do diesel pelo etanol no setor de transportes na redução das emissões de gases do efeito estufa. Ele pode ser validado a partir da seguinte análise:

- “A utilização do etanol como combustível em contrapartida ao diesel emite menos gases do efeito estufa para a mesma quantidade de energia liberada?”

Os aspectos particulares delimitam o escopo aos objetivos específicos da tese. Eles dissertam sobre o uso do etanol hidratado como combustível em extensor de autonomia para ônibus urbanos híbridos eletrificados, em contrapartida a ônibus urbanos convencionais alimentados a diesel. Parte-se do pressuposto que, para o mesmo desempenho de operação, a introdução da nova tecnologia apresenta impactos ambientais positivos, mantendo-se o desempenho do veículo. Dessa forma, os aspectos particulares podem ser validados a partir das seguintes análises:

- “Qual o impacto da utilização de extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbridos do tipo *plug-in*, em contrapartida a ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel, em relação à emissão de gases do efeito estufa?”,
- “Qual a relação das emissões de poluentes atmosféricos (NO_x, MP, CO e HC) por km dirigido quando se utiliza extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbridos *plug-in*, em contrapartida ao uso de ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”,

- “Qual a autonomia de ônibus urbanos eletrificados operando com extensores de autonomia alimentados a etanol e como ela se relaciona aos ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”, e
- “Existe viabilidade econômica para substituição de ônibus urbano convencional, alimentado a diesel por ônibus urbano eletrificado com extensor de autonomia alimentado a etanol?”

6.1.1. Validação do Aspecto Geral

Para analisar quantitativamente o possível impacto climático da substituição do diesel pelo etanol no setor de transportes é preciso considerar as emissões no ciclo de vida de cada combustível, quando aplicados em veículos.

Para analisar as emissões no ciclo de vida dos combustíveis é preciso definir as fronteiras do sistema de análise. Para fins dessa tese, as fronteiras do sistema analisado compreendem do poço a roda (*well-to-wheel*), ou seja, todos os processos necessários para produção, transporte e distribuição do combustível até sua utilização em um veículo automotor.

As emissões do uso de combustíveis podem ser divididas em emissões diretas e indiretas.

Emissões diretas são todas as emissões relacionadas ao principal processo sob análise e controle da parte interessada, nesse caso a conversão da energia química em energia mecânica em um veículo através da queima de combustível. Outras parcelas de emissões também podem ser consideradas como emissões diretas, como por exemplo, emissões fugitivas devido à evaporação do combustível no tanque. Contudo, essas parcelas são significativamente menores que as emissões provenientes da queima do combustível. Dessa forma, para fins de simplificação, essas emissões serão desconsideradas nesse trabalho.

Emissões indiretas podem ser divididas em emissões de *upstream*, compreendendo todos os processos anteriores ao principal processo analisado – como a produção, transporte e distribuição do combustível até o tanque do veículo (*well-to-tank*) – ou ainda emissões de *downstream*, compreendendo processos posteriores ao principal processo analisado – como manejo de resíduos e reciclagem. Como as fronteiras do sistema compreendem até o processo de utilização do combustível, as possíveis emissões de *downstream* são desconsideradas.

No mais, também é necessário fazer a distinção entre CO₂ fóssil e CO₂ biogênico. CO₂ fóssil é todo CO₂ produzido a partir da oxidação de compostos fósseis, como petróleo, gás natural ou carvão. A sua produção e emissão incrementa a quantidade de CO₂ na atmosfera. CO₂ biogênico é todo CO₂ proveniente da oxidação de compostos orgânicos. Efetivamente, a emissão de CO₂ biogênico não altera a quantidade de CO₂ na atmosfera, uma vez que, para a produção dos compostos orgânicos, o CO₂ da atmosfera foi capturado e armazenado na forma de hidrocarbonetos, como na fotossíntese, por exemplo. Dessa forma, a parcela de emissões diretas em biocombustíveis, como o etanol hidratado, etanol anidro e biodiesel, é cancelada pelo CO₂ que foi previamente absorvido da atmosfera. Assim, o balanço de emissões diretas é nulo.

Esteves, da Costa et al publicaram (ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022), em relatório sobre descarbonização do setor de transporte rodoviário da EPE, as intensidades de carbono de diversos combustíveis, distribuídas entre *well-to-tank* e *tank-to-whell* no contexto brasileiro (Figura 29)

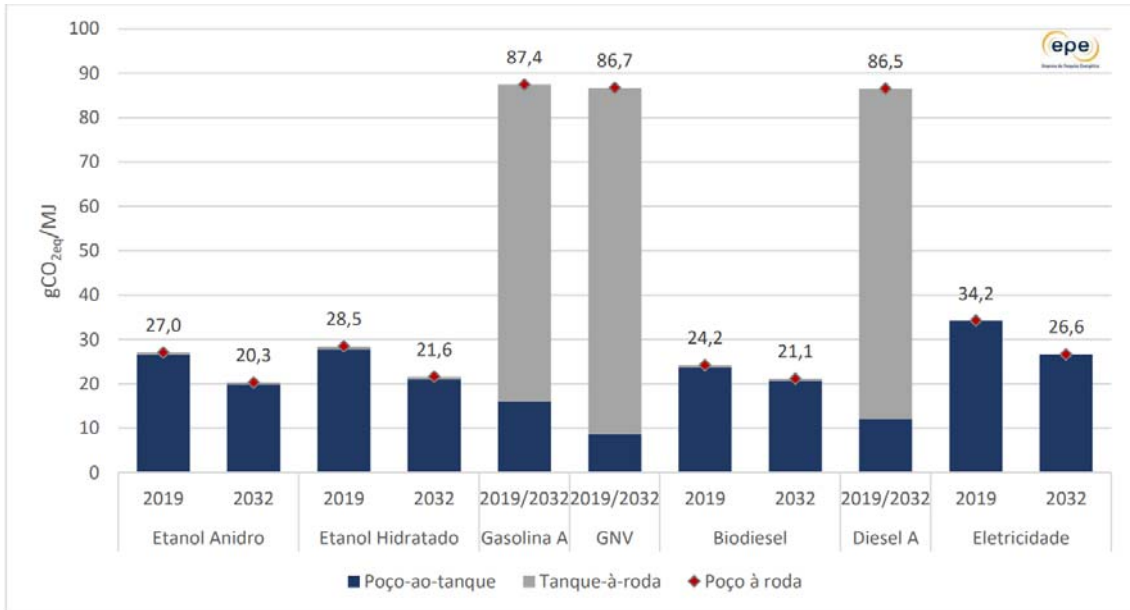


Figura 29 – Distribuição de emissões poço-ao-tanque e tanque-à-roda de alguns dos principais combustíveis utilizados no setor de transportes no Brasil. (Fonte da imagem: ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022)

Contudo, o gráfico da Figura 29 não apresenta dados específicos para Gasolina tipo C e Diesel B. Desde 2008, o diesel combustível brasileiro possui percentual crescente de biodiesel, conforme Leis Federais 13.033/2014 (CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL, 2014) e 13.263/2016 (CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL, 2016). Assim, para os cálculos do diesel B utilizado, foi considerado percentual de 11%, representativo para o ano de 2020, em conformidade com as referências de emissões. De forma semelhante, a gasolina tipo C também contém percentual de etanol anidro, 27%.

A Equação 17 (ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022) apresenta a fórmula para cálculo de intensidade de emissões para misturas de combustíveis, como o caso do diesel tipo B e a gasolina tipo C.

$$\left[\frac{gCO_2e}{MJ} \right]_{Xn} = \frac{\left[\frac{gCO_2e}{MJ} \times \frac{MJ}{L} \times (100 - \%v) \right]_{X0} + \left[\frac{gCO_2e}{MJ} \times \frac{MJ}{L} \times (\%v) \right]_{X1}}{\left[\frac{MJ}{L} \times (100 - \%v) \right]_{X0} + \left[\frac{MJ}{L} \times (\%v) \right]_{X1}} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde

X_n representa a emissão da mistura de combustíveis,

X_0 representa o combustível primários da mistura,

X_1 representa o combustível secundário da mistura,

$\%v$ representa o percentual volumétrico do combustível X_1 ou X_2 na mistura,

$\frac{gCO_2e}{MJ}$ representa as emissões em gCO_2e por MJ de combustível, X_0 , X_1 ou X_n ,

e

$\frac{MJ}{L}$ representa o poder calorífico inferior do combustível

As Equações 18 e 19, desenvolvidas com análise dimensional, e Onde:

ρ representa a densidade da mistura ou de cada um dos combustíveis, e

$\% v$ representa o percentual volumétrico de cada combustível na mistura.

Tabela 16 mostram os valores e a forma de cálculo para a densidade e PCI das misturas de combustíveis, diesel tipo b, gasolina tipo c e etanol hidratado.

$$PCI_{mistura} = \%m_{combustível\ 1} \cdot PCI_{combustível\ 1} + \%m_{combustível\ 2} \cdot PCI_{combustível\ 2} \quad \text{Eq. 18}$$

Onde:

PCI representa o poder calorífico inferior da mistura ou de cada um dos combustíveis, e

$\%m$ representa o percentual mássico de cada combustível na mistura.

e

$$\rho_{mistura} = \%v_{combustível\ 1} \cdot \rho_{combustível\ 1} + \%v_{combustível\ 2} \cdot \rho_{combustível\ 2} \quad \text{Eq. 19}$$

Onde:

ρ representa a densidade da mistura ou de cada um dos combustíveis, e

$\% v$ representa o percentual volumétrico de cada combustível na mistura.

Tabela 16 – Poder calorífico inferior e densidade dos combustíveis padrão, de acordo com a referência, e das misturas utilizadas. Fonte: Elaboração própria com dados de (EPE, 2022).

Combustível	Referência	Densidade (kg/L)	PCI (MJ/kg)	PCI (MJ/L)
Gasolina tipo A	EPE, 2022	0,742	43,514	32,287
Etanol anidro		0,791	28,242	22,339
Diesel tipo A		0,840	42,258	35,497
Biodiesel		0,880	37,656	33,137
Etanol Hidratado		0,809	26,359	21,325
Gasolina tipo C	Equações 5 e 6	0,755	39,195	29,601
Diesel tipo B	Equações 5 e 6	0,844	41,731	35,238

Assim, através da Figura 29 e da Onde:

ρ representa a densidade da mistura ou de cada um dos combustíveis, e

% v representa o percentual volumétrico de cada combustível na mistura.

Tabela 16, é possível montar a Tabela 17 para comparação de emissões diretas e indiretas entre etanol hidratado, diesel tipo B (B11) e gasolina tipo C (E27).

Tabela 17 – Consolidado de Emissões Diretas, Indiretas e Totais para diversos combustíveis. (Fontes: adaptado de ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022, Figura 29 e Onde:

ρ representa a densidade da mistura ou de cada um dos combustíveis, e

% v representa o percentual volumétrico de cada combustível na mistura.

Tabela 16)

Combustível	Referência	Emissões Diretas (gCO ₂ e/kWh)	Emissões Indiretas (gCO ₂ e/kWh)	Emissões Totais (gCO ₂ e/kWh)
Diesel tipo A	Esteves, Da Costa, et al, 2022	270,78	40,62	311,40
Biodiesel		0,00	87,12	87,12
Gasolina tipo A		258,17	56,47	314,64
Etanol Anidro		0,00	97,20	97,20
Etanol Hidratado		0,00	102,67	102,67
Diesel (B11)	Esteves, Da Costa, et al, 2022 e Tabela 5	242,77	45,43	288,20
Gasolina tipo C (E27)		205,56	64,77	270,33

Percebe-se que as emissões totais do Diesel tipo B (288,20 gCO₂e/kWh) e da Gasolina tipo C (270,33 gCO₂e/kWh) são próximas, com diferença de menos de 7% para a Gasolina tipo C. Entretanto, as emissões do Etanol Hidratado (102,67 gCO₂e/kWh) são muito menores, aproximadamente 35,6% das emissões do Diesel tipo B. Isso indica que a utilização do etanol no setor de transportes, em linhas gerais, pode descarbonizar 64,6% das emissões da frota circulante. Esse valor não é imutável, uma vez que depende do contexto de emissões *well-to-tank* do etanol, no sentido que, à medida que o uso de combustíveis e energias renováveis são integradas na cadeia de valor da produção do etanol, essas emissões também tendem a diminuir. Por outro lado, também é preciso considerar a eficiência nas tecnologias que realizam a conversão dos combustíveis, diesel tipo B no ciclo Diesel e etanol hidratado no ciclo Otto.

6.1.2. Validação de Aspectos Particulares

Os aspectos particulares pertinentes ao tema da tese são:

- a) “A utilização de extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbrido *plug-in*, em contrapartida a ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel tipo B, emite menos gases do efeito estufa e material particulado por km dirigido?”,
- b) “Qual a relação das emissões de poluentes atmosféricos (CO, HC e NO_x) por km dirigido quando se utiliza extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbrido *plug-in* em contrapartida a ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”,

- c) “Qual a autonomia de ônibus urbanos eletrificados operando com extensores de autonomia alimentados a etanol e como ela se relaciona aos ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”, e
- d) “Existe viabilidade econômica para substituição de ônibus urbano convencional, alimentado a diesel por ônibus urbano eletrificado com extensor de autonomia alimentado a etanol?”

A seguir são dissertados os aspectos particulares.

- a) “A utilização de extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbrido *plug-in*, em contrapartida a ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel tipo B, emite menos gases do efeito estufa e material particulado por km dirigido?”,
e
- b) “Qual a relação das emissões de poluentes atmosféricos (CO, HC e NOx) por km dirigido quando se utiliza extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado em ônibus urbanos híbrido *plug-in* em contrapartida a ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”,

Para analisar quantitativamente o impacto da substituição do diesel tipo B em ônibus urbano convencional pelo etanol hidratado em ônibus urbano híbrido *plug-in* no setor de transportes é preciso considerar as emissões de cada combustível, quando aplicados em veículos.

Na Tabela 18 são apresentados valores médios de emissões em gramas de poluente por quilometro para veículos que utilizam diesel tipo B (com adição de 11% em

volume de biodiesel, refletidos no PCI e na densidade) em ônibus urbanos (por serem os mais adequados ao objetivo dessa tese), gasolina tipo C (com adição de 27% em volume de etanol anidro, refletidos no PCI e na densidade) e etanol hidratado (95,1% de etanol anidro e 4,9% de água em volume, refletidos no PCI e na densidade). Para gasolina tipo C e etanol foram considerados automóveis *flex-fuel* em ciclo Otto. Foram considerados os mesmos valores de emissões de MP da gasolina tipo c para o etanol como um limite superior conservador. Os dados são retirados do relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo 2020 (CETESB, 2022). Em tal relatório, veículos pesados são ensaiados seguindo o *European Stationary Cycle* (ESC), em 13 diferentes condições de carga e rotação (CETESB, 2022). É importante destacar que o *European Stationary Cycle* (ESC) é um modelo de testes em condições estacionárias que pode ser utilizado para simulação de trajetos urbanos, mas que não considera explicitamente o uso do ar-condicionado.

Tabela 18 – Comparação do nível de emissões por quilometro entre diesel, gasolina tipo C e etanol hidratado. (Fonte: Elaborado e adaptado com base em CETESB, 2022). Os valores não podem ser comparados entre si.

Emissão de poluentes e autonomia por km para cada combustível. As emissões não são comparáveis						
Combustível	CO2 (g/km)	NOx (g/km)	MP (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	Autonomia (km/L)
Diesel tipo B (ônibus urbano)	1219	2,634	0,024	0,393	0,039	2,1
Gasolina tipo C (flex fuel)	149	0,011	0,001	0,264	0,026	14,8
Etanol Hidratado (flex fuel)	143	0,012	0,001	0,315	0,066	10,2

A Equação 20 foi elaborada por análise dimensional para encontrar os valores em g/km para emissões de CO₂ e do diesel sendo utilizado em ônibus urbano, pois tais valores não estavam disponíveis no relatório da referência⁴.

⁴ Embora o relatório dispusesse de valores de emissões em g/km de N₂O e CH₄ para ônibus urbanos operando com Diesel tipo B e ainda considerando os potenciais de aquecimento global do N₂O e CH₄ como, respectivamente, 28 e 265 (IPCC, 2014), foi realizado teste de sensibilidade para

$$emissão \left[\frac{g_{poluente}}{km} \right] = \frac{emissão \left[\frac{g_{poluente}}{kWh_{no\ eixo\ do\ motor}} \right] \cdot densidade \left[\frac{g_{diesel}}{L} \right]}{consumo \left[\frac{g_{diesel}}{kWh_{no\ eixo\ do\ motor}} \right] \cdot autonomia \left[\frac{km}{L} \right]} \quad Eq. 20$$

Onde:

Contudo, os valores expressos na Tabela 18 não podem ser comparados diretamente, uma vez que as categorias de veículos selecionadas possuem parâmetros muito diferentes entre si, como pesos, dimensões, regimes de operação etc. Basta observar, por exemplo, a autonomia de veículos do tipo ônibus urbano na Tabela 18, que é quase cinco vezes menor do que a de automóveis ciclo Otto utilizando etanol, muito embora o poder calorífico inferior do diesel seja maior do que o do etanol (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2011). Para realizar a comparação, é preciso normalizar os valores de emissões para bases energéticas. Ou seja, a comparação pode ser realizada quando se expressa as emissões em gramas de poluentes por energia fornecida por cada combustível (kWh medido na entrada do motor). A fórmula de cálculo para conversão das emissões para g/kWh é apresentada na Equação 21.

$$emissão \left[\frac{g_{poluente}}{kWh_{PCI}} \right] = \frac{emissão \left[\frac{g}{km} \right] \cdot autonomia \left[\frac{km}{L} \right]}{densidade \left[\frac{kg}{L} \right] \cdot PCI \left[\frac{kWh}{kg} \right]} \quad Eq. 21$$

Assim, é possível adicionar os valores de emissões indiretas para CO₂e dos diferentes combustíveis, disponíveis na Tabela 17 com os valores de emissões diretas para CO₂e e para os outros poluentes atmosféricos disponíveis na Tabela 18, convertidos para grama de poluente por kWh de energia presente no combustível na entrada do motor. Esses valores são expressos na Tabela 19. Os valores não consideram a eficiência na utilização do combustível.

utilização desses valores e constatou-se que não são materiais, uma vez que são muito menores do que as emissões de CO₂, representando aumento de aproximadamente 0,7% nas emissões totais de CO₂e (0,03*265+0,06*28)/1219. Dessa forma, foram desconsiderados para simplificação dos cálculos.

Tabela 19 – Comparação do nível de emissões de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos por energia disponível no combustível na entrada do motor para diesel tipo B, gasolina tipo C e etanol hidratado. As emissões para CO₂e são o somatório de emissões diretas e indiretas, enquanto para os outros poluentes os valores representam emissões diretas. (Fonte: elaboração própria, com dados de CETESB, 2022 e ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022).

Emissão totais de poluentes CO ₂ e (diretas e indiretas) e diretas para os demais, para cada combustível em transportes					
Combustível	CO ₂ e (g/kWh)	NO _x (g/kWh)	MP (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)
Diesel tipo B (ônibus urbano)	300,82	0,55	0,005	0,082	0,008
Gasolina tipo C (flex fuel)	333,05	0,02	0,002	0,475	0,047
Etanol Hidratado (flex fuel)	102,67	0,02	0,002	0,565	0,118
Referência	Adaptado de CETESB, 2022 (emissões diretas, zeradas para o etanol) e ESTEVES, DA COSTA, <i>et al.</i> , 2022 (emissões indiretas)		Adaptado de CETESB, 2022		

Pode-se considerar um ônibus urbano híbrido elétrico-etanol como um ônibus elétrico com extensor de autonomia alimentado a etanol hidratado operando em ciclo Otto.

O estudo da EPE sobre avaliação técnico-econômica de ônibus elétricos no Brasil (EPE, 2020) apresenta valores para consumo desses veículos no Brasil. O estudo apresenta diversos ciclos de testes, dentre eles o *Central Business District*, caracterizado por alta densidade de passageiros, trajeto por regiões de densa urbanização e tráfego intenso. A média dos valores de consumo para um ciclo de testes do tipo *Central Business District* é de 1,07 kWh/km.

De Miranda (DE MIRANDA, P. E.V., CARREIRA, *et al.*, 2017) mostraram que ônibus urbano híbridos de 12 metros apresentam consumo de 1,6 kWh/km, com ar-condicionado ligado, em condições mais severas. Em veículos eletrificados, o processo de obtenção do consumo de energia em kWh/km pode ser realizado através da medição da energia consumida durante a operação do veículo no circuito planejado, dividida pela distância total percorrida em tal circuito (Pereira, 2007). De acordo com Nesamani

(NESAMANI, PANDEY, *et al.*, 2021), somente o ar-condicionado consome mais de 40% da energia contida nas baterias do veículo. Dessa forma, dividindo o consumo de De Miranda et al. de 1,6 kWh/km por 1,4, encontra-se consumo conservador de 1,14 kWh/km sem ar-condicionado, utilizado para os cálculos futuros de emissões nessa tese, e que é muito próximo do valor apresentado na média de consumo em ciclo de testes *Central Business District* do estudo da EPE, corroborando para a robustez e confiabilidade do parâmetro.

Motores a etanol operando em condições estequiométricas apresentam eficiências térmicas típicas da ordem de 28,34% (NOCE, HANRIOT, *et al.*, 2020). Assumindo perdas da ordem de 10% em balanço de planta (arrefecimento e controle do gerador, dentre outros) e na conversão da energia mecânica em energia elétrica no gerador, obtém-se eficiência total de 25,5% na conversão da energia contida no etanol para energia elétrica disponível para uso pelo veículo híbrido.

Assim, pode-se estimar as emissões em g/km do ônibus híbrido elétrico-etanol através da multiplicação do consumo em kWh/km pelas emissões em g/kWh presentes na Tabela 19, divididos pela eficiência total na conversão da energia do etanol em energia elétrica, conforme a Equação 22. A Tabela 20 apresenta a comparação das emissões entre ônibus urbanos convencionais a diesel tipo B e ônibus urbanos híbrido elétrico-etanol

$$\frac{g_{poluente}}{km_{h\u00edbrido\ etanol}} = \frac{consumo \left[\frac{kWh}{km} \right] \cdot emiss\u00f5es \left[\frac{g}{kWh} \right]}{efici\u00eancia\ total\ na\ convers\u00e3o} \quad \text{Eq. 22}$$

Tabela 20 – Comparativo de emissões entre ônibus urbanos convencionais a diesel tipo B e ônibus urbanos híbrido elétrico-etanol hidratado (Fonte: elaboração própria, com dados de CETESB, 2022 e ESTEVES, DA COSTA, *et al.*, 2022)

Comparativo de consumo e emissão de poluentes entre tipos de ônibus urbano						
Veículo e Combustível	Consumo - PCI combustível (MJ/km)	CO ₂ e (g/km)	NO _x (g/km)	MP (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Ônibus Urbano Convencional diesel tipo B - Análise Teórica	17,19	1219,25	2,63	0,02	0,39	0,04
Ônibus Urbano Híbrido Elétrico-Etanol Hidratado - Análise Teórica	16,09	459,00	0,10	0,01	2,52	0,53

Percebe-se que a eficiência energética na utilização de um ônibus diesel convencional e o ônibus híbrido elétrico etanol estimado são semelhantes, com o ônibus híbrido elétrico etanol aproximadamente 7% mais eficiente.

Percebe-se também que um ônibus híbrido elétrico-etanol emite muito menos emissões de CO₂e do que um ônibus convencional operando a diesel tipo B, apenas 37,6%. Surpreendentemente, esse valor é muito próximo da proporção encontrada na seção anterior, quando foram comparadas as emissões considerando a energia presente nos dois combustíveis, muito embora o motor ciclo Diesel seja, notoriamente, mais eficiente que o motor ciclo Otto. Tal fato aponta para o considerável ganho de eficiência no sistema de veículo híbrido elétrico-etanol em relação ao ônibus convencional com diesel tipo B.

Para os NO_x, a emissão do diesel tipo B em ônibus convencional é 26 vezes maior que a do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol. Isso ocorre devido à alta temperatura da combustão no ciclo diesel, aliada à mistura pobre, com alto teor de oxigênio, que promove reações de oxidação do nitrogênio do ar admitido.

O diesel combustível é reconhecidamente um vilão em se tratando de emissões de MP. Isso está refletido nas emissões da Tabela 19. A queima do diesel tipo B em ônibus convencional emite três vezes mais material particulado que o etanol hidratado em ônibus híbrido-elétrico. Uma explicação para a grande quantidade de emissões de MP no ciclo Diesel é pela forma como ocorre a combustão. Uma vez que, no ciclo Diesel, a queima ocorre espontaneamente, pelo aumento da pressão e da energia interna, diversos pontos de início de combustão são criados dentro do cilindro, de forma que o resíduo desse

processo está mais pulverizado do que no caso da combustão com centelha, que produz uma frente de chama uniforme.

Para o CO, a emissão do diesel tipo B em ônibus convencional é menor que a do etanol em ônibus híbrido-elétrico. O diesel tipo B emite, na amostra, 15,5% do CO que o etanol hidratado emite para a mesma quantidade de energia. Isso acontece porque o ciclo Diesel normalmente opera com misturas mais pobres, ou seja, com mais oxigênio, o que promove a reação para formação de CO₂ em detrimento da formação de CO. Ressalta-se que as emissões de CO em geral são muitas ordens de grandeza menores que as emissões de CO₂e.

Para os HC, o diesel tipo B em ônibus convencionais emite em média 7,5% do que o etanol hidratado emite em ônibus híbrido-elétrico. Novamente, a justificativa é o regime de operação do ciclo diesel, mais pobre, com mais oxigênio, e a forma como ocorre a detonação nesse ciclo. No ciclo Otto, a detonação ocorre milissegundos após o centelhamento produzido pela vela. No ciclo Diesel, ela ocorre de forma espontânea, com o aumento da pressão. Essa pressão, muito mais elevada que no ciclo Otto, faz com que a energia interna da mistura no ciclo Diesel, e por conseguinte a temperatura, sejam bastante mais elevadas. Dessa forma, uma maior parte dos hidrocarbonetos é queimada completamente em relação ao ciclo Otto.

Percebe-se que, para o desempenho de função semelhante em transportes, o ônibus urbano, o ônibus convencional utilizando diesel tipo B emite muito mais CO₂e, NO_x e MP quando comparado ao ônibus híbrido elétrico-etanol, ao passo que o último emite mais CO e HC.

Considerando os impactos em mudança do clima, as emissões diretas e indiretas de CO₂e do ônibus convencional com diesel tipo B são muito significativas. Ademais,

algumas variantes do NO_x também promovem a formação de ozônio troposférico, que é um gás de efeito estufa.

Considerando o MP em suspensão, o ônibus convencional com diesel tipo B também contribui de forma marcante para o seu aumento, magnificando os efeitos da má qualidade do ar local.

Apesar do ônibus híbrido-etanol emitir maiores quantidades de CO do que o diesel, essas emissões não são expressivas do ponto de vista de mudanças climáticas quando comparadas com a redução das emissões de CO_2 , uma vez que o CO não é um gás do efeito estufa. Notoriamente, o CO emitido a partir da combustão incompleta apresenta grandes riscos em ambientes fechados. Contudo, em ambientes abertos, o CO tende a ser oxidado por radicais livres de hidroxila na atmosfera, transformando-se em CO_2 .

Apesar das emissões de HC da queima do etanol serem maiores que a do diesel, os componentes contidos no seu inventário de hidrocarbonetos não reagidos são menos danosos. Siciliano et al. (SICILIANO, DA SILVA, *et al.*, 2021) mostraram que a maior parte dos hidrocarbonetos não reagidos do etanol é composta por etano, eteno e etino, com concentração desprezível de componentes aromáticos. Em contrapartida, o inventário de hidrocarbonetos não reagidos da queima de diesel emite componentes aromáticos, que são altamente carcinogênicos.

Dessa maneira, a substituição do uso do diesel pelo etanol tem impacto positivo na redução da mudança climática e na de concentração de poluentes na atmosfera, reduz o índice de doenças cardiovasculares e respiratórias em regiões de alta demanda por mobilidade e impulsiona a transição energética dos fósseis para combustíveis menos poluentes.

- c) “Qual a autonomia de ônibus urbanos eletrificados operando com extensores de autonomia alimentados a etanol e como ela se relaciona aos ônibus urbanos convencionais, alimentados a diesel?”, e

Idealmente, um ônibus híbrido elétrico-etanol *plug-in* deverá ter autonomia suficiente para realização do percurso diário, considerando tamanho de linha e frequência, de modo que seu abastecimento e recarga só aconteça durante pernoite, quando a energia elétrica tem custo reduzido e a frequência das linhas permite maior tempo para manutenção. Dessa forma, para análise da viabilidade de ônibus híbridos elétrico-etanol em linhas de ônibus urbanos, é preciso estimar sua autonomia considerando a energia disponível em baterias e a energia líquida disponível no combustível e em seguida comparar com a autonomia necessária para a execução de um percurso diário.

Não foi encontrada na literatura uma autonomia mínima necessária para operação diária em ônibus urbanos. Contudo, percebe-se que operações normais costumam exigir pelo menos 300 km de autonomia diária, conforme reportado pela Urbanização de Curitiba S/A, que reporta quilometragens médias diárias entre 240 e 298 km (URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S/A, 2022), ou ainda pela média diária de quilometragem nas linhas do Rio de Janeiro, de 217 km (PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO, 2024).

A autonomia total do ônibus híbrido elétrico-etanol pode ser calculada através da Equação 23.

$$\begin{aligned}
 & \textit{autonomia total [km]} = \\
 & \frac{PCI_{\text{etanol hidratado}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{L}} \right] * \textit{Capacidade do Tanque [L]} * \textit{eficiência do motor ciclo Otto} + \textit{Energia em baterias [kWh]}}{\textit{consumo do ônibus híbrido} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right]} \quad \text{Eq. 23}
 \end{aligned}$$

Para essa análise, considerou-se o consumo do ônibus híbrido elétrico-etanol operando com utilização do ar-condicionado em três regimes ϕ de operação distintos,

conforme de Miranda, 2017 (DE MIRANDA, P. E.V., CARREIRA, *et al.*, 2017), de 1,10 kWh/km, 1,35 kWh/km e 1,6 kWh/km, respectivamente φ_1 , φ_2 e φ_3

Dessa forma, a Figura 30 apresenta comparativo entre a autonomia do ônibus híbrido elétrico-etanol nos diferentes regimes de operação, através da análise teórica.

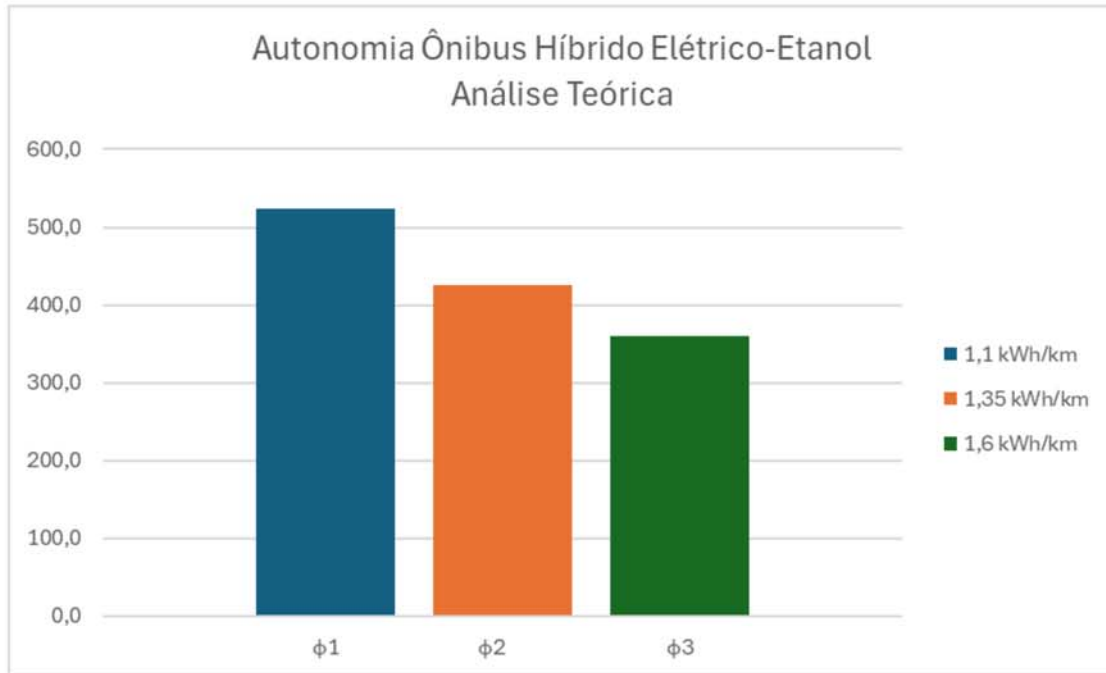


Figura 30 – Comparativo de Autonomia do ônibus híbrido elétrico-etanol por análise teórica de acordo com regime de operação e consumo.

Assim, considera-se que o ônibus híbrido elétrico-etanol possui autonomia suficiente para operação diária, estabelecida em 300 km, em todos os regimes de operação analisados, sem necessidade de recarga ou abastecimento ao longo do dia.

- d) “Existe viabilidade econômica para substituição de ônibus urbano convencional, alimentado a diesel por ônibus urbano eletrificado com extensor de autonomia alimentado a etanol?”

A análise econômica da substituição das tecnologias pode ser analisada, dentre outras, através de duas metodologias, Custo total do proprietário (*Total Cost of Ownership – TCO*) ou Custo Nivelado de Dirigir (*Levelized Cost of Driving – LCOD*). O LCOD é uma abordagem simplificada do TCO, mas que é significativa quando se deseja comparar diferentes formas de tração em veículos de categorias semelhantes (21ST CENTURY TRUCK PARTNERSHIP, 2023), como é o caso de ônibus urbano convencional a diesel e ônibus urbano híbrido elétrico-etanol, e será a metodologia utilizada nessa tese. A Tabela 21 apresenta o comparativo de parâmetros considerados entre as duas metodologias.

Tabela 21 - Comparativo entre as metodologias LCOD e TCO para análise de custos entre as duas tecnologias, ônibus urbano convencional a diesel e ônibus urbano híbrido elétrico-etanol. A análise TCO é significativa quando o objeto da comparação são dois trens de força diferentes. (Fonte: Traduzido de 21ST CENTURY TRUCK

PARTNERSHIP, 2023)

	Parâmetros	LCOD	TCO
Custos de Capital	Custo de aquisição do Veículo	Sim	Sim
	Valor de Revenda	Sim	Sim
	Custos de Financiamento	Não	Sim
	Seguro	Não	Sim
	Registro	Não	Sim
	Taxas e Incentivos	Não	Sim
Custos de Operação	Custo com Combustível	Sim	Sim
	Salário de Motoristas	Não	Sim
	Manutenção	Não	Sim
	Pedágios	Não	Sim
	Penalidades em Tempos de Recarga	Não	Sim
	Penalidades em Limites de Carga	Não	Sim

Os custos de aquisição de ônibus urbano convencional, a diesel varia significativamente dependendo da região de aquisição, lote, condições comerciais e itens de série. O estudo da EPE – Avaliação Técnico-Econômica de ônibus Elétrico no Brasil (EPE, 2020) mostrou que, em 2019, para ônibus urbano do tipo padron, com ar

condicionado, o custo de aquisição era de em torno de R\$544.00,00. Utilizando a correção pelo IPCA desde janeiro de 2019 até maio de 2024, o mesmo ônibus custaria R\$752.365,18. Por outro lado, o Governo Federal divulgou, em maio de 2024 o resultado da seleção para o Novo PAC Seleções 2023, na categoria de Cidades Sustentáveis e Resilientes – Mobilidade Urbana Sustentável: Renovação de Frota. Através do programa, o Governo Federal financiará ônibus diesel Euro 6 e elétricos, respectivamente em R\$2,6 bi para 3.015 unidades e R\$7,3 bi para 2.296 unidades (GOVERNO FEDERAL - CASA CIVIL, 2024). Dessa forma, é possível estimar o valor unitário de um ônibus diesel em R\$862.354,89. Esses valores são significativamente maiores que os valores disponíveis no estudo da EPE, ainda que corrigidos pelo IPCA, contudo, foram selecionados para os cálculos por contemporaneidade.

Por outro lado, o custo de aquisição de um ônibus urbano híbrido elétrico pode ser estimado através do custo de aquisição de um ônibus elétrico, do custo de aquisição do sistema de recarga e do custo de aquisição de um sistema de extensão de autonomia. O custo de aquisição de um ônibus elétrico é estimado em R\$3.179.442,51 através do Novo PAC – Seleções 2023. O custo de aquisição do sistema de recarga é estimado em US\$50.000,00 (EPE, 2020) ou R\$282.425,00 na cotação atual. Já o custo do extensor de autonomia é definido como R\$230.000,00, percebidos ao longo do desenvolvimento do sistema proposta nessa tese, contemplando o motor de combustão interna, o gerador e todos os sistemas auxiliares e desenvolvimentos para integração. Assim, o custo total de aquisição do ônibus híbrido elétrico-etanol é de R\$3.691.867,51.

Conforme o estudo da EPE (EPE, 2020), considerou-se 5 anos como o tempo de vida útil do ônibus urbano convencional a diesel. Para o ônibus urbano híbrido elétrico-etanol, considerou-se a vida útil do modelo elétrico, de 10 anos. Assim, supondo que ambos os veículos desempenhem o mesmo trajeto de aproximadamente 300 km por dia,

com redução de 20% na frequência aos finais de semana e considerando 104 finais de semana e 261 dias úteis no ano, o ônibus urbano convencional a diesel terá percorrido 516.300 km em sua vida útil, enquanto o ônibus híbrido elétrico-etanol terá percorrido 1.032.600 km em sua vida útil.

Após a vida útil do veículo em grandes cidades, é comum a sua comercialização em mercados secundários. Esse valor de revenda é função da depreciação dos veículos e da taxa residual. A taxa residual para ambos os veículos foi estipulada em 5%, de acordo com o estudo da ZEBRA (*Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator*) (REBOUÇAS, ROZENFELD, *et al.*, 2022).

Assim, os custos de aquisição dos veículos são reduzidos em 5%, para R\$819.237,15 para o ônibus convencional a diesel e R\$3.507.274,13 para o ônibus híbrido elétrico-etanol. Isso se traduz em custos por quilômetro de **1,59 R\$/km para o ônibus urbano convencional diesel e 3,40 R\$/km para o ônibus urbano híbrido elétrico-etanol.**

O custo com combustível é composto exclusivamente pelo diesel tipo B S10 no ônibus urbano convencional a diesel. Através da Tabela 18, percebe-se que a autonomia para esse tipo de veículo é de 2,1 km/L. Dessa forma, o consumo de um ônibus urbano a diesel é de 0,476 L/km. Adicionalmente, a ANP mantém base atualizada com os custos de combustíveis nas distribuidoras, distribuídos por estado (ANP, 2024a). A Figura 31 apresenta a evolução do custo do litro do diesel tipo B S10 para o estado do Rio de Janeiro.

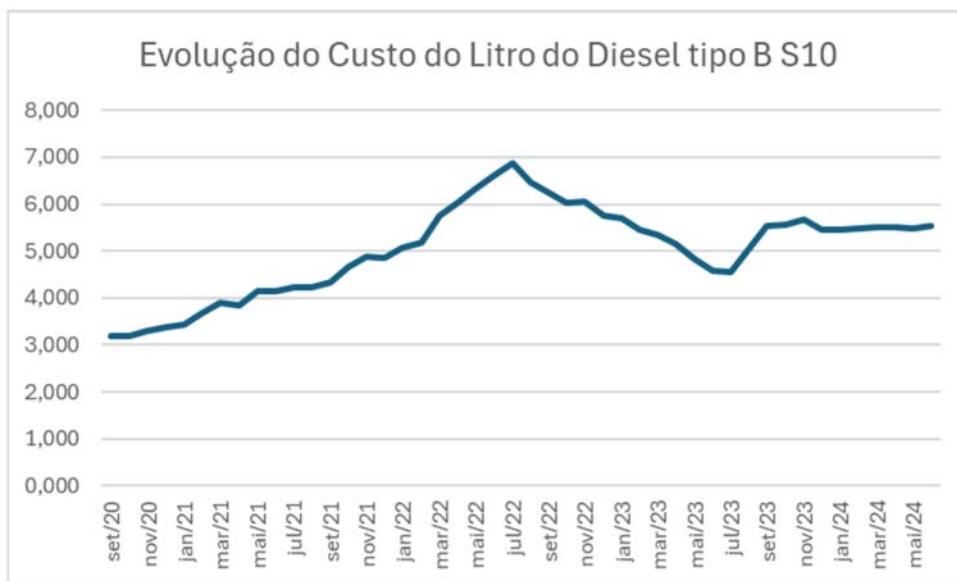


Figura 31 – Evolução do custo do diesel tipo B S10 em distribuidoras no Rio de Janeiro.

(Fonte: Elaboração própria com dados de ANP, 2024)

Percebe-se que é grande a flutuação no custo do litro do diesel tipo B S10, o que torna imprecisas as tentativas de previsão futuras de custos. Dessa forma, e percebendo a formação de um platô desde o segundo semestre de 2023, adotar-se-á para esse estudo a média de custos mais atuais, em maio de 2024, de 5,49 R\$/L, considerados em uma autonomia diária de 300 km. Assim, **o custo com combustível de operação para o ônibus urbano convencional a diesel tipo B S10 é de 2,61 R\$/km.**

Para o ônibus híbrido elétrico-etanol, o custo de operação com combustível é função do consumo específico, do regime de operação, φ_1 , φ_2 e φ_3 e do custo do etanol e da energia elétrica.

Utilizando os mesmos dados da ANP (ANP, 2024a), é possível perceber na Figura 32 uma variação semelhante no preço do etanol hidratado ao do diesel tipo B S10. Dessa forma, o valor estipulado para o litro do etanol nesse estudo também será a média do valor mais atual, de maio de 2024, de R\$3,43.

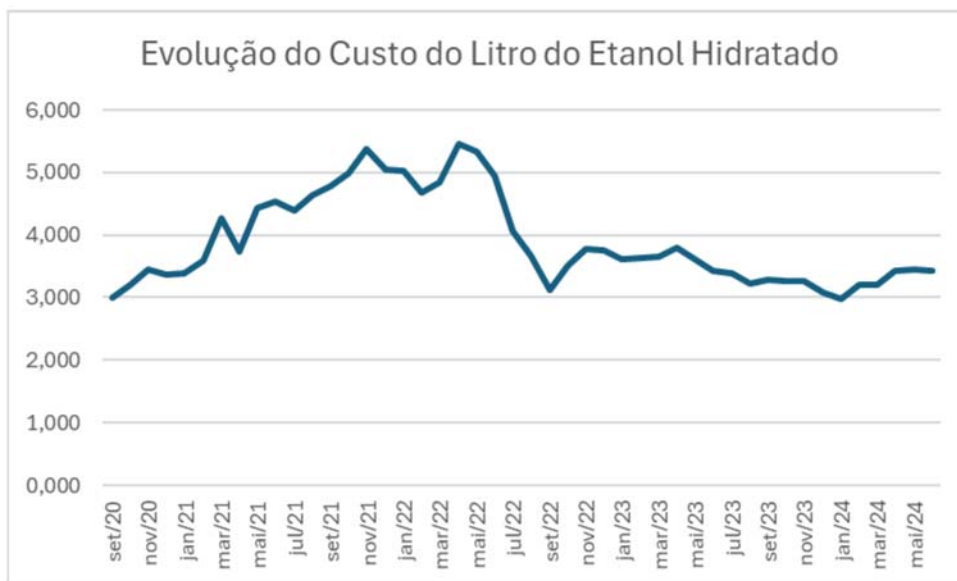


Figura 32 - Evolução do custo do etano hidratado em distribuidoras no Rio de Janeiro.

(Fonte: Elaboração própria com dados de ANP, 2024)

O custo da energia elétrica é uma variável de maior incerteza em relação ao custo do combustível. Isso porque ele é composto por parcelas diferenciadas, que dependem da potência contratada, da tensão, de impostos federais, estaduais e municipais, de inadimplências dos outros consumidores, além do próprio custo de geração e distribuição da energia, entre outros. Para o preciso dimensionamento dos custos com energia elétrica, faz-se necessário elaborar o projeto elétrico do sistema de abastecimento com todas as cargas utilizadas, além do local onde será instalado e do período de consumo. Tais parametrizações fogem ao escopo dessa tese. Contudo, para margens de comparação, foram definidos parâmetros com base no estudo da EPE sobre Avaliação Técnico-Econômica de Ônibus Elétrico no Brasil (EPE, 2020). Dessa forma, consideraram-se as tarifas da Light S.A. (LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A, 2024) para o município do Rio de Janeiro, com enquadramento do local de recarga no subgrupo A4, com menor faixa de alta tensão, variando entre 2,3 kV e 25 kV. Considerou-se também a demanda de potência para recarga em 30 kW, com consumo fora de ponta. Dessa forma,

a Equação 24 apresenta a forma de cálculo para o custo do kWh, e a Tabela 22 apresenta os parâmetros para o cálculo.

$$\text{Custo da energia} \left[\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}} \right] = \left(\frac{(TUSD+TE)_{\text{demanda}}}{30} * \text{Demanda Contratada} + (TUSD + TE)_{\text{consumo}} * \text{Consumo} \right) * (1 + ICMS + PIS + COFINS)$$

Eq. 24

Tabela 22 – Composição do custo do kWh com impostos e taxas de demanda, distribuição e geração para o caso específico da Light S.A em julho de 2024 (Fonte: adaptado para o caso específico com base em LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A, 2024).

Tarifa de Média Tensão Horo-Sazonal Verde (Light S.A. em Julho de 2024)			
Subgrupo	Demanda Contratada (R\$/kW)	Consumo fora de Ponta (R\$/kW)	Impostos
A4 (2,3 a 25 kV)	TUSD+TE	TUSD+TE	(ICMS+PIS+COFINS)
	22,78	0,50859	27,50%

Onde TSUD e TE são as tarifas de, respectivamente, distribuição e geração da energia.

Para o custo total da operação diária, foram considerados os três regimes de operação estabelecidos anteriormente, φ_1 , φ_2 e φ_3 , considerando a utilização de toda energia disponível em baterias e parte da energia disponível em etanol para alcançar os 300 km de. O custo por km de cada um desses cenários está apresentado na Tabela 23.

Tabela 23 – Regime de operação e custos por km com etanol e energia elétrica na operação de um ônibus híbrido elétrico-etanol – análise teórica.

Condição de Operação	R\$/km na análise teórica
φ_1	1,92
φ_2	2,50
φ_3	3,10

Assim, de posse dos valores para custos de capital e de operação, é possível montar a Tabela 24 a fim de comparar os custos totais das duas tecnologias, ônibus urbano convencional a diesel e ônibus urbano híbrido elétrico-etanol.

Tabela 24 – Comparativo de custos entre as duas tecnologias, ônibus urbano convencional operando com diesel e ônibus elétrico-etanol utilizando a metodologia LCOD (Fonte: Elaboração própria).

	Parâmetros	Ônibus Urbano Convencional Diesel Análise Teórica	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_1	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_2	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_3
CAPEX	Custo de aquisição do Veículo - Valor da Revenda	1,59	3,4	3,4	3,4
OPEX	Custo com Combustível	2,61	1,92	2,50	3,10
Custo Total de Dirigir (R\$/km - LCOD)		4,2	5,32	5,90	6,50

Percebe-se que o LCOD do ônibus urbano híbrido elétrico-etanol é entre 26,7% e 54,7% mais caro que o custo do ônibus urbano convencional a diesel. Percebe-se grande influência do regime de operação no custo da operação, com os custos relacionados ao regime ϕ_1 significativamente menores que ϕ_2 e ϕ_3 .

Em suma, em relação a emissões de gases efeito estufa e poluentes atmosféricos, a análise teórica demonstra claras vantagens para o uso do ônibus híbrido elétrico-etanol, apontando para reduções de 65% nas emissões de CO₂e em relação ao ônibus urbano convencional, com reduções em emissões de NO_x aproximadamente em 97% e em MP em aproximadamente 66%. Como contrapartida, as emissões de HC e de CO são aumentadas, mas de forma bem menos expressivas.

Percebe-se também que ônibus híbrido elétrico-etanol possuem autonomia necessária para operação diárias em linhas comerciais de grandes metrópoles, como em Curitiba e no Rio de Janeiro.

Por fim, percebe-se que os custos da nova tecnologia são maiores que o do ônibus urbano convencional. Possíveis explicações são o fato de os custos de aquisição dos ônibus urbanos elétricos híbridos ainda serem elevados devido à baixa penetração no mercado, e ainda a necessidade de incentivos para a substituição de frotas e utilização do biocombustível, como por exemplo através de mercado de créditos de carbono. Outro fator importante é a que veículos convencionais a diesel não arcam com os custos das

externalidades que provocam. Análises mais detalhadas, como o TCO, podem apresentar valores significativamente diferentes uma vez que parcelas adicionais, como taxas, manutenção e incentivos, puderem ser incorporadas.

6.2. Validação Experimental

A análise dos resultados experimentais consiste em comparação com os valores encontrados na análise teórica para analisar aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos. O ponto de operação selecionado nas medições experimentais para comparação com os valores teóricos foi o de 75% de carga, por ser mais representativo em termos de menores consumo e emissões.

6.2.1. Análise de Critérios Técnicos, Ambientais e Sociais

Considerando a utilização do CESE-Etanol em ônibus urbano eletrificado, em condições semelhantes ao estipulado na Seção 6.1 e através da Equação 10 e da eficiência total do conjunto de 29,83%, presente na Tabela 15, é possível calcular a autonomia total de ônibus híbrido elétrico-etanol com dados experimentais do CESE-Etanol para os três regimes φ_1 , φ_2 e φ_3 . Os resultados encontrados são da ordem de 590 km, 480 km e 405 km, respectivamente. A Figura 33 apresenta esses resultados.

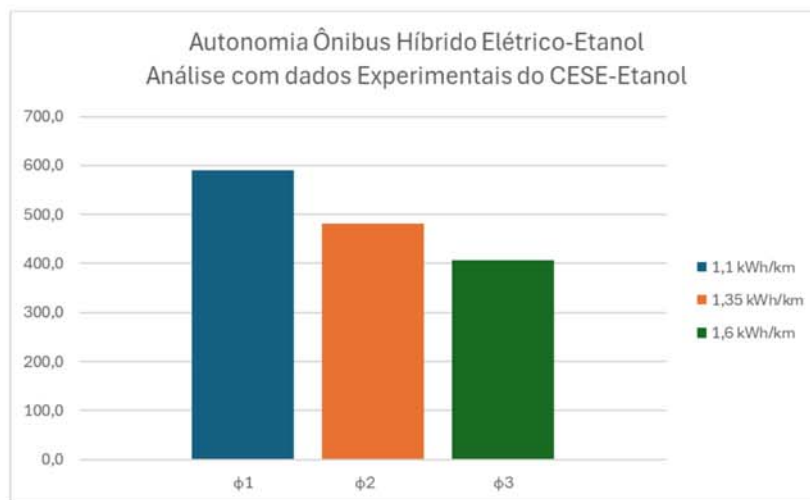


Figura 33 - Comparativo de Autonomia do ônibus híbrido elétrico-etanol por análise com dados experimentais de operação do CESE-Etanol, de acordo com regime de operação e consumo.

Percebe-se que a autonomia estimada para o ônibus híbrido elétrico-etanol com uso do CESE-Etanol é bastante superior a 300 km estabelecido como limite superior na demanda de autonomia diária para um ônibus urbano em todos os regimes de operação. Percebe-se também que a autonomia a partir dos dados experimentais do CESE-Etanol é 13% maior do que a prevista pela análise teórica para as condições de operação φ_1 , φ_2 e φ_3 . Essa comparação é mostrada na Figura 34.

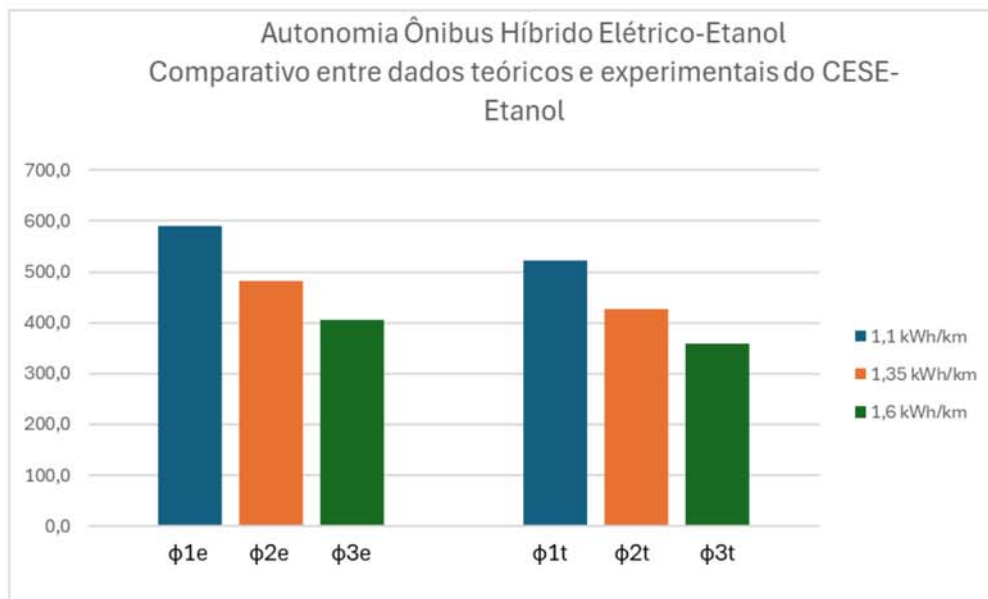


Figura 34 – Comparativo de autonomia entre ônibus híbrido elétrico-etanol com dados teóricos e com dados experimentais do CESE-Etanol em modo bancada, extrapolados para o veículo

Assim, considerando os critérios de potência instantânea e autonomia, há viabilidade técnica na utilização de ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-Etanol.

Os valores de emissões encontrados no experimento representam emissões anteriores ao catalisador. Para possibilitar a comparação com valores de emissões em veículos disponíveis na literatura e utilizados na análise teórica realizada previamente, foi considerado um catalisador do tipo 3 vias com eficiência de aproximadamente 97% para

oxidação do CO e 91% para oxidação do HC em operação conforme as condições dos testes, em regime estequiométrico, ou seja, com $\lambda = 1$, de acordo com Heywood, 2018 (HEYWOOD, 2018). Uma vez que o conjunto de dados experimentais não dispunha de emissões de NO_x, para esse poluente foram considerados os mesmos dados da análise teórica, assim como para o MP. Assim, a Tabela 25 representa os valores de consumo específico e emissões estimadas para após o catalisador em operação em 75% de carga do CESE-Etanol.

Tabela 25 – Consumo específico e emissões medidas em pré-catalisador e estimadas para pós-catalisador, referentes a conjunto do CESE-Etanol operando em modo estacionário com 75% de carga em ônibus.

75% (Estimado Pós-Catalisador)	Parâmetro	Unidade	Média	Desvio Padrão	Incerteza Tipo A
	Consumo Específico de Combustível no Conjunto	g/kWh _{elétrico}	470,92	6,73	2,03
	Eficiência Total do Conjunto (Considerando BdP)	%	29,83	0,42	0,13
	Consumo Instantâneo (fluxímetro - etanol anidro)	g/h	22961	205	62
	Emissão Específica de CO ₂ do conjunto	g/kWh _{elétrico}	898,02	14,07	4,24
	Emissão Específica de CO do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,42	0,02	0,00
	Emissão Específica de HC do conjunto	g/kWh _{elétrico}	0,02	0,00	0,00

Dessa forma, através da Tabela 25, da Tabela 20 e dos parâmetros selecionados na Seção 6.1, é possível estimar experimentalmente o consumo e as emissões específicas em gramas por quilômetro para um ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-etanol e compará-las com a análise teórica realizada na Seção 6.1. A Tabela 26 apresenta essa comparação.

Tabela 26 – Comparação entre consumo e emissões específicas [g/km] estimada por análise experimental com CESE-Etanol para ônibus híbrido elétrico-etanol e por análise teórica para ônibus híbrido elétrico-etanol e ônibus convencional a diesel.

Comparativo de consumo e emissão de poluentes entre tipos de ônibus urbano						
Consumo - PCI						
Veículo e Combustível	combustível (MJ/km)	CO ₂ e (g/km)	NO _x (g/km)	MP (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)
Ônibus Urbano Convencional diesel tipo B - Análise Teórica	17,19	1219,25	2,63	0,02	0,39	0,04
Ônibus Urbano Híbrido Elétrico-Etanol Hidratado - Análise Teórica	16,09	459,00	0,10	0,01	2,52	0,53
Ônibus Urbano Híbrido Elétrico-Etanol com CESE-Etanol - Estimativa Experimental	13,76	392,38	0,09 (teórico)	0,01 (teórico)	1,59	0,07

Percebe-se redução expressiva no consumo de energia por quilômetro quando comparadas as diferentes tecnologias, com os resultados experimentais do CESE-Etanol estimados em um ônibus etanol consumindo 80% da energia consumida por quilômetro em um ônibus convencional a diesel. Percebe-se também redução no uso da nova tecnologia em todos os parâmetros de emissões específicas medidos, quando comparadas com as análises teóricas realizadas previamente, e redução nas emissões de CO₂e, NO_x e MP quando comparados ao veículo convencional a diesel.

Na análise teórica, a redução de emissões de CO₂ com o uso do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol em relação a ônibus convencional a diesel tipo B era da ordem de 62,4%, já na estimativa experimental, a redução é da ordem de 67,8%.

Na análise teórica, as emissões de CO aumentaram com o uso do etanol hidratado. As emissões de CO uso do diesel tipo B em ônibus convencional representava 15,5% das emissões do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol. Na estimativa experimental, a emissão do uso do diesel tipo B representa 24,5%.

Na análise teórica, as emissões de HC aumentaram com o uso do etanol hidratado. As emissões de HC com uso do diesel tipo B em ônibus convencional representava 7,5% das emissões do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol. Na estimativa experimental, a emissão do uso do diesel tipo B representa 57%.

As emissões de NO_x e MP não foram realizadas de forma experimental. Dessa maneira, essas emissões presentes na Tabela 26 são estimadas como as mesmas da análise teórica. Ou seja, redução de, respectivamente, 96,2% e 50% para o NO_x e o MP. Contudo,

percebe-se tendência de redução em todas as emissões experimentais quando comparado com a análise teórica. Dessa forma, espera-se que os benefícios reais na redução de emissões de NO_x e MP sejam superiores aos estabelecidos na análise teórica.

Assim, considerando a redução expressiva nas emissões de CO_2 , percebe-se impacto climático muito positivo na substituição do ônibus urbano convencional a diesel tipo B por ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-Etanol. As emissões de HC e CO apresentaram aumento em relação ao cenário atual. Contudo, pelo tipo de poluente de maior predominância no HC do etanol hidratado em relação ao diesel tipo B, pela porcentagem diminuta na concentração de CO em relação aos outros poluentes e pela expressiva redução na emissão de NO_x e MP, considera-se balanço positivo para impactos ambientais e sociais.

6.2.2. Análise de Viabilidade Econômica

Para a realização da viabilidade econômica, foi calculado o LCOD do ônibus híbrido elétrico-etanol com medidas experimentais do CESE-Etanol para, em seguida, realizar comparação com os custos da análise teórica nos regimes φ_1 , φ_2 e φ_3 .

A composição de custos para o LCOD do ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-Etanol envolve as mesmas parcelas dissertadas na Seção 6.1, ou seja, custos fixos, decrescidos do custo de revenda de 5%, para aquisição do ônibus elétrico de R\$3.179.442,51, aquisição do sistema de recarga de R\$282.425,00, aquisição do sistema de extensão de autonomia de R\$230.000,00 e custo do litro do etanol hidratado em R\$3,43. Para o custo total da operação diária de 300 km com etanol e eletricidade, foram considerados os mesmos regimes φ_1 , φ_2 e φ_3 . Os custos da operação diárias estão expressos na Tabela 27.

Tabela 27 – Custos com etanol e energia elétrica na operação diária de 300 km de autonomia para o ônibus híbrido elétrico-etanol

Condição de Operação	R\$/km na análise com dados experimentais do CESE-Etanol
ϕ_1	1,28
ϕ_2	1,78
ϕ_3	2,29

Assim, a Tabela 28 apresentam comparativos de custos LCOD entre a análise teórica de um ônibus convencional a diesel tipo b, análise teórica de ônibus híbrido elétrico-etanol e análise de um ônibus híbrido elétrico-etanol com CESE-Etanol a partir de resultados experimentais do CESE-Etanol, os dois últimos operando nos regimes ϕ_1 , ϕ_2 e ϕ_3 .

Tabela 28 – Comparativo de custos, utilizando a metodologia LCOD, entre as três tecnologias, ônibus urbano convencional operando com diesel tipo B em análise teórica, ônibus elétrico-etanol em análise teórica e ônibus elétrico-etanol utilizando CESE-Etanol, em estimativa experimental a partir de medições do CESE-Etanol

Parâmetros		Ônibus Urbano Convencional Diesel Análise Teórica		
CAPEX	Custo de aquisição do Veículo - Valor da Revenda	1,59		
OPEX	Custo com Combustível	2,61		
Custo Total de Dirigir (R\$/km - LCOD)		4,2		
Parâmetros		Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_1	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_2	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol Análise Teórica - Regime ϕ_3
CAPEX	(Custo de aquisição do Veículo - Valor da Revenda)	3,4	3,4	3,4
OPEX	Custo com Combustível	1,92	2,50	3,10
Custo Total de Dirigir (R\$/km - TCOD)		5,32	5,90	6,50
Parâmetros		Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol c/ CESE-Etanol - Regime ϕ_1	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol c/ CESE- Etanol - Regime ϕ_2	Ônibus Urbano Híbrido Elétrico Etanol c/ CESE-Etanol - Regime ϕ_3
CAPEX	(Custo de aquisição do Veículo - Valor da Revenda)	3,14	3,40	3,40
OPEX	Custo com Combustível	1,28	1,78	2,29
Custo Total de Dirigir (R\$/km - LCOD)		4,42	5,18	5,69

Assim, percebe-se que o ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-Etanol no regime de operação φ_1 apresenta redução de aproximadamente 17% quando comparado ao mesmo regime de operação na análise teórica, fruto do aumento de eficiência global do sistema pela utilização do CESE-Etanol.

Quando comparado ao veículo a diesel, percebe-se que o custo nivelado de dirigir para o regime de operação φ_1 é muito semelhante ao ônibus híbrido elétrico-etanol, com aumento de em torno de apenas 5% na utilização da nova tecnologia. Tal fato pode ser explicado pela parcela dos custos de aquisição do ônibus elétrico, que amortizam os benefícios financeiros da redução no consumo de combustível. Esse resultado aponta para a necessidade de ganho de escala na aquisição da tecnologia, ou ainda a necessidade de incentivos específicos para a produção e utilização de tecnologias menos poluentes, como por exemplo o impulsionamento dos créditos de carbono, a fim de permitir que a nova tecnologia seja, além de menos poluente, mais economicamente viável.

Capítulo 7

7. Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Esta tese teve como objetivo principal explorar a lacuna de conhecimento existente na análise de viabilidade ambiental, social e econômica da substituição de ônibus urbanos convencionais a diesel por ônibus híbridos a etanol, através da fabricação e testes de um sistema de extensão de autonomia para veículos eletrificados. Por meio das pesquisas bibliométrica e de revisão bibliográfica, foi possível demonstrar a evolução do tema nas publicações científicas, ressaltando a importância do etanol combustível no contexto brasileiro e identificando oportunidades significativas para a descarbonização do setor de transportes.

A análise teórica conduzida evidenciou vantagens claras na substituição tecnológica, com reduções significativas nas emissões de CO₂e, NO_x e material particulado (MP), em comparação com ônibus urbanos convencionais. Em contrapartida, as emissões de hidrocarbonetos (HC) e monóxido de carbono (CO) apresentaram um aumento, embora em valores absolutos menos expressivos. Foi confirmado que os ônibus híbridos elétrico-etanol possuem a autonomia necessária para operações diárias em

grandes metrópoles como Curitiba e Rio de Janeiro, apresentando, no melhor caso custo nivelado de dirigir (LCOD) apenas 26,7% maior que os ônibus convencionais.

No processo de fabricação do CESE-Etanol, os testes de desempenho e análises de gases indicaram eficiência total na conversão da energia química do etanol em energia elétrica de 29,83%, com reduções ainda mais expressivas nos parâmetros de emissões específicas do que as análises teóricas.

Na análise experimental, a redução de consumo de energia do ônibus híbrido-etanol foi da ordem de 20% quando comparado ao ônibus convencional a diesel, com consumo de 13,76 MJ/km, comparados a 17,19 MJ/km do ônibus a diesel. As emissões de CO₂ com o uso do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol são da ordem de 67,8%. As emissões de NO_x e MP não foram realizadas de forma experimental. Dessa maneira, essas emissões presentes foram somente estimadas na análise teórica, e apresentaram redução de, respectivamente, 96,2% e 50%. Percebe-se tendência de redução em todas as emissões experimentais quando comparado com a análise teórica. Dessa forma, espera-se que os benefícios reais na redução de emissões de NO_x e MP sejam superiores aos estabelecidos na análise teórica. Como contrapartida, as emissões de CO e HC foram maiores na nova tecnologia. As emissões de CO e HC, respectivamente, em ônibus convencional representam 24,5% e 57% das emissões do etanol hidratado em ônibus híbrido elétrico-etanol.

Assim, considerando a redução expressiva nas emissões de CO₂, percebe-se impacto climático positivo na substituição do ônibus urbano convencional a diesel tipo B por ônibus híbrido elétrico-etanol operando com CESE-Etanol. Pelo tipo de poluente de maior predominância no HC do etanol hidratado em relação ao diesel tipo B, pela porcentagem diminuta na concentração de CO em relação aos outros poluentes e pela

expressiva redução na emissão de NO_x e MP, considera-se balanço positivo também para impactos ambientais e sociais.

Em termos de autonomia, a utilização do ônibus híbrido elétrico-etanol com dados experimentais do CESE-Etanol apresenta autonomia de 590 km no melhor regime de operação e de 405 km no regime mais severo. Essa autonomia é bastante superior ao necessário para operação diária.

Em relação aos custos totais ao dirigir (LCOD) na análise experimental com o CESE-Etanol, o cenário mais otimista apresentou um custo 5% superior comparado aos veículos convencionais a diesel. Esse resultado aponta para a viabilidade atual da nova tecnologia, frente ao ônibus convencional a diesel. Possíveis fatores que poderiam corroborar com sua penetração no mercado são os ganhos de escala e criação de incentivos, a fim de reduzir os custos de aquisição.

A substituição do veículo convencional a diesel pela tecnologia com menores emissões também aponta para redução de impedâncias percebidas por passageiros, dentre elas ruído e vibração. A redução dessas impedâncias, além da percepção de sustentabilidade ambiental e possibilidade de circulação possíveis zonas de descarbonização promovem o uso do transporte público. No mais, a nova tecnologia também apresenta benefícios sociais, à medida que emite material particulado e ruído em menor intensidade, reduzindo o nível de poluição atmosférica e sonora do ambiente onde circula em comparação com o ônibus convencional a diesel, o que aumenta diretamente a qualidade de vida dos que transitam pela região.

Por fim, sugere-se alguns temas que complementam o estudo aqui realizado:

- Medição dos parâmetros de desempenho e de emissões com sistema instalado em veículo eletrificado e comparação com os resultados obtidos em modo estacionário.

- Estimativa de emissões indiretas para os poluentes atmosféricos selecionados - CO, HC, NO_x, MP- e comparação com os resultados obtidos.
- Realização dos experimentos com aparato experimental com capacidade para medição de NO_x e resolução para medição pós catalisador, e comparação com os resultados apresentados.
- Extrapolação da utilização para substituição de sistemas estacionários de geração de energia, para descarbonização de outros setores, que não o de transportes. Nesse caso, pode-se pensar também na possibilidade de captura do carbono biogênico presente no escapamento para armazenamento ou produção de combustíveis sintéticos.
- Medição de nível de ruído e vibração e comparação com veículos convencionais para extrapolação de estimativa de redução de impedâncias percebidas pelos passageiros e motorista.
- Percepção de passageiros sobre a tecnologia visando maior adoção do transporte público.

Referências Bibliográficas

21ST CENTURY TRUCK PARTNERSHIP. "Electrification Technologies Sector Team Roadmap", 2023. .

ABVE. **Áreas de Mobilidade Urbana Verde**. 2017. Associação Brasileira do Veículo Elétrico. Disponível em: <http://www.abve.org.br/muv/>.

AINSWORTH, E. A., LEMONNIER, P., WEDOW, J. M. "The influence of rising tropospheric carbon dioxide and ozone on plant productivity", **Plant Biology**, v. 22, n. S1, p. 5–11, 2020. DOI: 10.1111/plb.12973. .

ALPHA HOLDINGS, L. **Ethanol History**. 2019. Disponível em: <http://www.alphaholdingsllc.com/EthanolHistory.html>.

ANDERSON, L. G. "Ethanol fuel use in Brazil: Air quality impacts", **Energy and Environmental Science**, v. 2, n. 10, p. 1015–1037, 2009. DOI: 10.1039/b906057j. .

ANFAVEA. **Anuário da Indústria Automobilística Brasileira 2023**. . [S.l: s.n.], 2023. Disponível em: <https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2023/04/ANUARIO-ANFAVEA-2023.pdf>.

ANP. "Dados Abertos - Agência nacional do petróleo, gás natural e biocombustíveis", 2024a. Disponível em: <https://dados.gov.br/dados/organizacoes/visualizar/agencia-nacional-do-petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis-anp?colunaOrdenacao=nomeInventario&direcaoOrdenacao=ASC&pagina=1>.

ANP. **Especificação do biodiesel**. 2023. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - Ministério de Minas e Energia - Governo Federal. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>.

ANP. **Gasolina**. 2024b.

ANP. **Resolução N° 907 de 18 de Novembro de 2022: Dispõe sobre as especificações do etanol combustível e suas regras de comercialização em todo o território nacional**.

. [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-907-2022-dispoe-sobre-as-especificacoes-do-etanol-combustivel-e-suas-regras-de-comercializacao-em-todo-o-territorio-nacional?origin=instituicao>.

ATSDR. "ToxFAQs for Nitrogen Oxides (nitric oxide, nitrogen dioxide, etc.). CAS #10102-43-9 (nitric oxide); CAS #10102-44-0 (nitrogen dioxide)", v. 9, p. 43–44, 2002. Disponível em: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxfaq.html>.

BARBOSA CORTEZ, L. A., CRUZ, C. H. de B., SOUZA, G. M., *et al.* **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**. [S.l: s.n.], 2016.

CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD. **Carbon Monoxide & Health**. 2024. Disponível em: [https://ww2.arb.ca.gov/resources/carbon-monoxide-and-health#:~:text=Carbon monoxide is harmful because,oxygen delivery to the brain](https://ww2.arb.ca.gov/resources/carbon-monoxide-and-health#:~:text=Carbon%20monoxide%20is%20harmful%20because,oxygen%20delivery%20to%20the%20brain).

CANADA ENERGY REGULATOR. "Market Snapshot: How does a refinery turn crude oil into products like gasoline and diesel?", p. 1–4, 2018. Disponível em: <https://www.cer-rec.gc.ca/en/data-analysis/energy-markets/market-snapshots/2018/market-snapshot-how-does-refinery-turn-crude-oil-into-products-like-gasoline-diesel.html>.

CETESB. **Emissões veiculares 2020**. . [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>.

CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL. "Lei Federal 13.033/2014", p. 1–19, 2014. Disponível em: <http://www.congressonacional.leg.br/portal/>.

CONGRESSO NACIONAL DO BRASIL. "Lei Federal 13.263/2016", p. 1–19, 2016. Disponível em: <http://www.congressonacional.leg.br/portal/>.

COPPETEC, F. **Relatório Científico-Tecnológico Final - Convênio FURNAS PEM1622 VOL1**. . [S.l: s.n.], 2018

DE MIRANDA, P. E. V., CARREIRA, E. S., ICARDI, U. A., *et al.* "Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system", **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 19, p. 13949–13959, 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.155. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.12.155>.

DE MIRANDA, Paulo Emílio V. "Particulate materials: Threatening products resulting from burned fuels", **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 18, n. 4, p. i–iii, 2013. DOI: 10.1590/S1517-70762013000400001.

DE MIRANDA, Paulo Emílio V. **Science and Engineering of Hydrogen-Based Energy Technologies**. [S.l.], Academic Press, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128142516000010>.

DE MIRANDA, P E V, CARREIRA, E. S., ICARDI, U. A., *et al.* "Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system", 2017. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2016.12.155. .

DINIZ, L. C., FRANCO, P., PAULA, M. M. De. "ASPECTOS GERAIS DE PÓS-COLHEITA E PROCESSAMENTO DA CANA-DE- AÇÚCAR", 2023. .

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "Nitrogen oxides (NOx), why and how they are controlled", **Epa-456/F-99-006R**, n. November, p. 48, 1999. .

EPA. **Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)**. 2020a. US Environmental Protection Agency. Disponível em: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>.

EPA. **Overview of Greenhouse Gases**. 2020b. Epa.

EPE. "Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no brasil.", **Nota Técnica Epe/Dea-Dpg/See-Sdb/001/2020.**, n. Setembro, p. 1–45, 2020. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT_SEE-SDB - Avaliação Técnico-Econômica de Ônibus Elétrico no Brasil.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT_SEE-SDB_-_Avaliacao_Tecnico-Economica_de_Onibus_Eletrico_no_Brasil.pdf).

EPE. "Balanço Energético Nacional BEN 2022", **Balanço Energético Nacional 2022: Ano base 2021**, p. 264, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>.

EPE. "Balanço Energético Nacional Relatório Síntese 2023", **Relatório de síntese**, p. 65, 2023. .

ESTEVEES, H. B. B., DA COSTA, A. O., RIBEIRO, M. D. B., *et al.* "Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário: Intensidade de carbono das fontes de energia", 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/nota-tecnica-descarbonizacao-do-setor-de-transporte-rodoviario-intensidade-de-carbono-das-fontes-de-energia->.

FEDERATIVE REPUBLIC OF BRAZIL. "Intended Nationally Determined Contribution", **Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change**, v. 9, p. 6, 2015. DOI: <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published%20Documents/Brazil/1/BRAZIL%20iNDC%20english%20FINAL.pdf>. Disponível em: <http://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published Documents/Brazil/1/BRAZIL iNDC english FINAL.pdf%0Ahttp://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published Documents/Brazil/1/BRAZIL iNDC english FINAL.pdf%0Ahttp://www4.unfccc.int/Submissions/INDC/Published Doc>.

GOVERNO FEDERAL - CASA CIVIL. "Seleções 2023 – Renovação de frota", 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/selecoes/eixos/cidades-sustentaveis-e-resilientes/renovacao-de-frota>.

GRANET, I., BLUESTEIN, M. **Thermodynamics and Heat Power**. [S.l.], CRC PRESS-TAYLOR & FRANCIS GROUP, 2015.

HALL, D., MOULTAK, M., LUTSEY, N. "Electric vehicle capitals of the world: Demonstrating the path to electric drive", **The International Council on Clean Transportation**, n. March, p. 57, 2017. Disponível em: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/Global-EV-Capitals_White-Paper_06032017_vF.pdf.

HANSEN, J., SATO, M., RUEDY, R. "Global Temperature in 2022", v. 2022, n. December, 2022. Disponível em: <https://mailchi.mp/caa/global-temperature-in-2020?e=670df34344>.

HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2nd Editio ed. New York, McGraw-Hill Education, 2018. Disponível em:

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>.

INPI. **Propriedade Industrial - Depósito de Patente BR 10 2019 020973 9**. 2019.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. "Global EV Outlook 2023", **Geo**, n. Geo, p. 9–10, 2023. .

INTERNATIONAL ORGANISATION FOR STANDARDISATION. **ISO 14040:2006 - Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework**. . [S.l: s.n.]. , 2006

IPCC. "Global Warming Potential Values", **Global Warming Potential Values**, v. 2014, n. 1995, p. 2–5, 2014. Disponível em: [https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb 16 2016%29_1.pdf](https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%28Feb%2016%29_1.pdf).

KOBERLE, A. C., ROCHEDO, P. R. R., LUCENA, A. F. P., *et al.* "Brazil's emission trajectories in a well-below 2 degrees C world: the role of disruptive technologies versus land-based mitigation in an already low-emission energy system", **CLIMATIC CHANGE**, v. 162, n. 4, SI, p. 1823–1842, 2020. DOI: 10.1007/s10584-020-02856-6. .

KOVARIK, B. **Henry Ford, Charles Kettering and the Fuel of the Future**. 1998. Automotive History Review. Disponível em: <http://www.environmentalhistory.org/billkovarik/about-bk/research/henry-ford-charles-kettering-andthe-fuel-of-the-future/>.

KRITSANAVIPARKPORN, E., BAENA-MORENO, F. M., REINA, T. R. "Catalytic Converters for Vehicle Exhaust: Fundamental Aspects and Technology Overview for Newcomers to the Field", **Chemistry (Switzerland)**, v. 3, n. 2, p. 630–646, 2021. DOI: 10.3390/chemistry3020044. .

LIGHT SERVIÇOS DE ELETRICIDADE S/A. **Entenda a conta da sua empresa. Como são definidos os Tributos ? Tarifa de Média Tensão Verde**. 2024.

MARCOLIN, N. "Era quase aguardente (<https://revistapesquisa.fapesp.br/era-quase-aguardente/>)", 2008. .

MOSS, T., KINCER, J. "How does energy impact economic growth ? An overview of the

evidence", n. March, p. 1–2, 2023. Disponível em: <https://energyforgrowth.org/article/how-does-energy-impact-economic-growth-an-overview-of-the-evidence/>.

NASA. **Evidence: How Do We Know Climate Change Is Real?** 2022. Global Climate Change: Vital Signs of the Planet. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/evidence/>.

NATIONAL GEOGRAPHIC PORTUGAL. **James Watt e o caminho para a Revolução Industrial.** 2022.

NESAMANI, K., PANDEY, R., JAIN, R. "Optimized Power Utilization of Air Conditioner in Electric City Bus Using". 2021. **Anais [...]** [S.l: s.n.], 2021. DOI: 10.4271/2021-26-0142.

NOAA. **Carbon dioxide now more than 50 higher than pre-industrial levels.** 2022. Jun 3, 2022. Disponível em: <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>.

NOCE, T., HANRIOT, S. de M., MONTEIRO SALES, L. C., *et al.* "Energy Conversion Factor for Gasoline Engines in Real-World Driving Emission Cycle", **AUTOMOTIVE INNOVATION**, v. 3, n. 2, p. 169–180, jun. 2020. DOI: 10.1007/s42154-020-00098-x. .

OUR WORLD IN DATA. **Energy use per person, 2023.** 2023. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/per-capita-energy-use>.

PEREIRA, A.M.; Sistema de Tração de um Ônibus Elétrico Híbrido com Pilhas a Comustível e Baterias; Tese DSc; Universidade Federal do Rio de Janeiro; Coppe - Programa de Engenharia Elétrica; 2007

POURKHESALIAN, A. M., SHAMEKHI, A. H., SALIMI, F. "Alternative fuel and gasoline in an SI engine: A comparative study of performance and emissions characteristics", **Fuel**, v. 89, n. 5, p. 1056–1063, 2010. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.11.025. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2009.11.025>.

PREFEITURA DO RIO DE JANEIRO. **Total de linhas, frota operante, passageiros transportados, viagens realizadas, quilometragem coberta, combustível utilizado e pessoal ocupado pelo sistema de ônibus no Município do Rio de Janeiro entre 1984-**

2023. 2024. Disponível em:
<https://www.data.rio/documents/c09ef8f7d5de472c8624639070d97868/about>.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. "LEI Nº 13.755, DE 10 DE DEZEMBRO DE 2018". , 2018.

QUEIROZ ALBARELLI, U. **PRODUÇÃO D E AÇÚCAR E ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO: SIMULAÇÃO, INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA E ANÁLISE ECONÔMICA**. 2013. UNICAMP, 2013.

REBOUÇAS, A. B., ROZENFELD, T., DELGADO, O. **Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo**. . [S.l: s.n.], 2022. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/11/Sao-Paulo-ZEBRA-A4-v9-may22.pdf>.

RIDLEY, B. A., ANDREAE, M. O., CHAMEIDES, W. L., *et al.* "CHAPTER 5: Tropospheric Ozone", 1994. Disponível em: <https://www.esrl.noaa.gov/csd/assessments/ozone/1994/cover.html>.

RODRIGUE, J.-P. **The Geography of Transport Systems**. 5th. ed. Fifth edition. | Abingdon, Oxon ; New York, NY : Routledge, 2020., Routledge, 2020. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781000061468>.

SALAWITCH, R. J., CANTY, T. P., HOPE, A. P., *et al.* **Paris Climate Agreement : beacon of hope**. . [S.l: s.n.], 2017.

SALOMÃO, T. R., OLIVEIRA JUNIOR, R. de, AMARANTE, M. dos S. "A Evolução Do Motor a Combustão Ciclo Otto", **Pesquisa e Ação**, v. 4, n. 2015, p. 2–9, 2018. Disponível em: <https://revistas.brazcubas.br/index.php/pesquisa/article/view/388>.

SÃO PAULO. **Lei nº 15.997 de 27 de maio de 2014**. . [S.l: s.n.]. , 2014

SICILIANO, B., DA SILVA, C. M., LOUREIRO, L. N., *et al.* "Hydrocarbon emissions in flex fuel vehicles using ethanol: Preliminary results using a method implemented in Brazil", **Fuel**, v. 287, n. July, p. 119506, 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119506. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119506>.

SILVA, C. M., GONÇALVES, G. A., FARIAS, T. L., *et al.* "A tank-to-wheel analysis

tool for energy and emissions studies in road vehicles", **Science of The Total Environment**, v. 367, n. 1, p. 441–447, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.02.020>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969706001604>.

TAVARES, L. A. **James Watt: A trajetória que levou ao desenvolvimento da máquina a vapor vista por seus biógrafos e homens de ciências**. 2008. 1–74 f. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, 2008.

TIWARI, P. K., RAJ, S., KUMAR, S., *et al.* "Influence of calophyllum inophyllum and Jojoba oil methyl ester blended with n-pentanol additive upon overall performance, combustion and emission characteristics of a TDI engine operated in natural aspirated mode", **FUEL**, v. 288, mar. 2021. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119576. .

TRANSPORTATION HISTORY. **A Pioneering Developer of the Internal Combustion Engine Completes His Life’s Journey – Transportation History**. 2020. Transportation History. Disponível em: <https://transportationhistory.org/2020/08/04/a-pioneering-developer-of-the-internal-combustion-engine-completes-his-lifes-journey/>.

U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Clima Change Impacts**. 2024.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Alternative Fuels Data Center: Maps and Data - Global Ethanol Production by Country or Region**. 2023. Disponível em: <https://afdc.energy.gov/data/10331>.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Biomass Energy Data Book - Edition 4**. [S.l: s.n.], 2011.

U.S DEPARTMENT OF ENERGY. **Maintenance and Safety of Electric Vehicles**. 2023. Disponível em: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric_maintenance.html.

UN. "Paris Agreement", **Climate Action**, 2015. Disponível em: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_en.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Scopes 1, 2 and 3 Emissions Inventorying and Guidance**. 2024. Disponível em:

https://www.workforclimate.org/post/whats-the-difference-scope-1-2-and-3-corporate-emissions?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwIbu2BhA3EiwA3yXyu-Pt5fRs5S-g5TtKvZyPfAAGwMne6NqshxXypIJ1gc9Wbi1z0ofAARoCXIIQAvD_BwE.

URBANIZAÇÃO DE CURITIBA S/A. **Estatísticas do transporte Quilometragem Percorrida pelas Linhas da.** 2022. Disponível em: https://www.urbs.curitiba.pr.gov.br/transporte/estatisticas/quilometragem_media_diaria.

US DEPARTMENT OF COMMERCE, NOAA, G. M. L. **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.** 2024. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.

VALLERO, D. A. **Fundamentals of Air Pollution, Fourth Edition.** [S.l: s.n.], 2007.

VAZ, L., BARROS, D., CASTRO, B. de. **Veículos híbridos e elétricos : sugestões de políticas públicas para o segmento.** [S.l: s.n.], 2015.

WITTMANN, J. "Rudolf diesel (1858–1913) the man and his 100 year old engine", **Interdisciplinary Science Reviews**, v. 19, n. 3, p. 201–210, 1994. DOI: 10.1179/isr.1994.19.3.201.