

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ**

**ANÁLISE AMBIENTAL DA SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA BRT A DIESEL POR
TRÓLEBUS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO**

Paulo Vitor Gomes de Lima

Orientador: Prof. M.Sc. Sylvio José Gomes Magrani

**Rio de Janeiro
Julho de 2025**

PAULO VITOR GOMES DE LIMA

**ANÁLISE AMBIENTAL DA SUBSTITUIÇÃO DO SISTEMA BRT A DIESEL POR
TRÓLEBUS NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO**

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

Orientador: Prof. M.Sc Sylvio José Gomes
Magrani

**RIO DE JANEIRO
2025**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

L732 Lima, Paulo Vitor Gomes de
Análise ambiental da substituição do sistema BRT a diesel por
trólebus na cidade do Rio de Janeiro / Paulo Vitor Gomes de Lima –
2025.
89f.: il. (algumas color.) , enc.

Projeto Final (Graduação). Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia: f. 85-89.
Orientador: Sylvio José Gomes Magrani.

1. Engenharia mecânica. 2. Transportes – Rio de
Janeiro (RJ). 3. Sistemas BRT. 4. Trolebus. I. Magrani, Sylvio
José Gomes (Orient.). II. Título.

CDD 620.1

Dedico este trabalho à memória do meu
amado avô Maurillo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar força, sabedoria e saúde para chegar até aqui.

À minha família, por todo amor e apoio incondicional ao longo desta jornada.

Ao professor Me. Sylvio Jose Gomes Magrani, por sua paciência e dedicação em me orientar, fundamentais para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado e não permitiram que eu desistisse.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste projeto.

RESUMO

Motivado pela preocupação mundial crescente a respeito das mudanças climáticas geradas pelas emissões de gases de efeito estufa, este estudo tem como objetivo avaliar o impacto ambiental, energético e econômico da substituição da frota movida a diesel do sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) da cidade do Rio de Janeiro por trólebus (ônibus elétricos alimentados por rede aérea). A análise foi realizada com base no cenário *tank-to-wheel*, utilizando a ferramenta ReFrota, desenvolvida pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), para estimar as emissões e o consumo energético da frota movida a diesel. Os resultados indicaram um grande potencial de redução das emissões diretas de gases poluentes, como dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), promovendo uma melhoria significativa na qualidade do ar e contribuindo para mitigar os impactos climáticos. Do ponto de vista energético, a substituição proporcionaria uma redução de aproximadamente 26,7% no consumo total de energia equivalente, reduzindo a dependência externa por combustíveis fósseis. A análise econômica também demonstrou vantagens, com uma redução estimada de 18% nos custos energéticos mensais. Conclui-se que a substituição da frota movida a diesel por trólebus apresenta benefícios significativos e pode estabelecer um precedente para a eletrificação do transporte público em outras cidades brasileiras, contribuindo para uma mobilidade urbana sustentável e alinhada aos compromissos ambientais nacionais e internacionais.

Palavras-chave: *Bus Rapid Transit* (BRT); trólebus; gases de efeito estufa; poluentes atmosféricos; transporte público.

ABSTRACT

Motivated by growing global concern about climate change caused by greenhouse gas emissions, this study aims to assess the environmental, energy and economic impact of replacing the diesel-powered fleet of the Bus Rapid Transit (BRT) system in the city of Rio de Janeiro with trolleybuses (electric buses powered by overhead lines). The analysis was conducted based on the tank-to-wheel scenario, using the ReFrota tool, developed by the Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), to estimate the emissions and energy consumption of the diesel-powered fleet. The results indicated a great potential for reducing direct emissions of pollutant gases, such as carbon dioxide (CO₂), particulate matter (PM) and nitrogen oxides (NO_x), promoting a significant improvement in air quality and helping to mitigate climate impacts. From an energy perspective, the replacement would provide a reduction of approximately 26.7% in total equivalent energy consumption, reducing external dependence on fossil fuels. The economic analysis also demonstrated advantages, with an estimated 18% reduction in monthly energy costs. It is concluded that replacing the diesel-powered fleet with trolleybuses presents significant benefits and can set a precedent for the electrification of public transportation in other Brazilian cities, contributing to sustainable urban mobility aligned with national and international environmental commitments.

Keywords: Bus Rapid Transit (BRT); trolleybus; greenhouse gases; air pollutants; public transportation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Variação da temperatura média global da superfície terrestre.....	16
Figura 2: Potencial de aquecimento global (GWP-100) de gases de efeito estufa em relação ao CO ₂	18
Figura 3: Consumo global de energia primária por fonte.....	19
Figura 4: Emissões globais totais de GEE entre 1990 e 2023 (GtCO ₂ e/ano).	20
Figura 5: Emissões globais de GEE por país.....	21
Figura 6: Consumo de energia primária no Brasil por fonte.	22
Figura 7: Emissões líquidas brasileiras por GEE.	23
Figura 8: Emissões brutas de GEE por estado.	24
Figura 9: Emissões de GEE por tipo de gás no Rio de Janeiro.....	25
Figura 10: Emissões globais de GEE por setor.....	26
Figura 11: Emissões de GEE do setor de transporte no Brasil.	27
Figura 12: Emissões de CO ₂ provenientes de ônibus no estado do Rio de Janeiro.	27
Figura 13: Vista lateral dos componentes de um motor de combustão interna.	29
Figura 14: Vista frontal dos componentes de um motor de combustão interna.....	30
Figura 15: Componentes estacionários do motor.....	32
Figura 16: Componentes móveis do motor.....	33
Figura 17: Nomenclatura para motores alternativos cilindro-pistão.....	34
Figura 18: Os quatro tempos do motor alternativo ciclo Diesel.	35
Figura 19: Diagrama com os principais modelos de motores elétricos.	36
Figura 20: Vista dos componentes de um motor elétrico.....	37
Figura 21: "Elektromote", o primeiro trólebus construído no mundo.....	40
Figura 22: Trólebus em operação na cidade do Rio de Janeiro.....	41
Figura 23: Esquema do trólebus Caio – Millennium III BRT – Scania K270.....	42
Figura 24: Taxa de urbanização brasileira.	45
Figura 25: Distribuição percentual das viagens por modo de transporte.....	46
Figura 26: Tempo diário de viagem, em capitais brasileiras, em um percurso.....	47
Figura 27: Mobilidade na cidade do Rio de Janeiro (1950 – 2005).	49
Figura 28: Movimento médio de passageiros no transporte coletivo (em milhares) no município.....	49
Figura 29: Evolução da frota no município em 10 anos (em milhares).....	50
Figura 30: Visão Geral do sistema BRT e demais redes de transporte público de média a alta capacidade.....	53
Figura 31: Evolução dos limites máximos de emissão de NOx e MP no padrão Euro.	57
Figura 32: Distribuição da frota operante por tipo de veículo e padrão de emissão..	59
Figura 33: Composição da frota do BRT por tipo de veículo, padrão de emissão e lote.....	60
Figura 34: Composição da frota do BRT por lote.	61
Figura 35: Quilometragem mensal média por veículo.	62
Figura 36: Quilometragem mensal média por lote.....	63
Figura 37: Quilometragem mensal média por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.....	67
Figura 38: Emissões mensais de dióxido de carbono (CO ₂) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.....	69
Figura 39: Emissões mensais de material particulado (MP) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.....	70

Figura 40: Emissões mensais de óxidos de nitrogênio (NO _x) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.....	71
Figura 41: Consumo mensal total de óleo diesel por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.	73
Figura 42: Consumo mensal estimado de energia elétrica por lote operacional no cenário alternativo com trólebus.....	74
Figura 43: Oferta interna de energia elétrica por fonte.....	76
Figura 44: Comparativo do consumo energético mensal de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.....	77
Figura 45: Evolução das importações e exportações de óleo diesel no Brasil (2021–2025).	79
Figura 46: Comparativo do custo energético mensal de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.	80
Figura 47: Comparação dos custos médios de diesel (R\$/litro) e eletricidade (R\$/kWh) no Brasil entre 2019 e 2023.	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Maiores municípios emissores de GEE no Brasil.....	24
Tabela 2: Lista dos componentes de um motor de combustão interna.	31
Tabela 3: Quantidade total de trólebus no Brasil.....	41
Tabela 4: Sistema trólebus pelo mundo.....	44
Tabela 5: Detalhamento dos corredores BRT.	54
Tabela 6: Descritivo das dimensões e capacidades veiculares do sistema BRT.	55
Tabela 7: Detalhamento da frota BRT.....	56
Tabela 8: Fatores de emissão da ferramenta ReFrota por tipo de veículo e tecnologia	64
Tabela 9: Parâmetros comuns aos dois cenários.....	65
Tabela 10: Parâmetros específicos do cenário BRT movido a diesel	65
Tabela 11: Parâmetros específicos do cenário com trólebus.....	65
Tabela 12: Síntese dos parâmetros operacionais do sistema BRT inseridos na ferramenta ReFrota.	66
Tabela 13: Comparativo das emissões mensais estimadas de CO ₂ , MP e NO _x de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.....	75

LISTA DE NOMENCLATURAS E SIGLAS

B14 - Mistura de 14% de biodiesel ao diesel

BRT - *Bus Rapid Transit*

CH₄ - Metano

CO - Monóxido de carbono

CO₂ - Dióxido de Carbono

CO₂e - Dióxido de carbono equivalente

EURO - Padrão europeu de emissões

F-gases - Gases fluorados

GEE - Gases de Efeito Estufa

GWP - *Global Warming Potential* (Potencial de Aquecimento Global)

HC - Hidrocarbonetos

HFCs – Hidrofluorcarbonetos

kWh - quilowatt-hora

LULUCF - *Land Use, Land-Use Change and Forestry* (Uso da Terra, Mudança de Uso da Terra e Florestas)

MP - Material Particulado

N₂O - Óxido Nitroso

NDC - *Nationally Determined Contribution* (Contribuição Nacionalmente Determinada)

NO_x - Óxidos de Nitrogênio

PCI – Poder calorífero inferior

PFCs – Perfluorcarbonetos

PMI - Ponto morto inferior

PMM - Percurso Médio Mensal

PMS - Ponto morto superior

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

SF₆ - Hexafluoreto de enxofre

Tank-to-Wheel – do tanque à roda; emissões diretamente ligadas ao uso do veículo

VLT – Veículo Leve sobre Trilhos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. MOTIVAÇÃO	14
1.2. JUSTIFICATIVA	14
1.3. OBJETIVOS	14
1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 AS EMISSÕES DE POLUENTES	16
2.1.1 OS GASES DE EFEITO ESTUFA	17
2.1.2 PANORAMA GLOBAL	18
2.1.3 PANORAMA BRASILEIRO	21
2.1.4 AS EMISSÕES DE GEE NO SETOR DE TRANSPORTE	25
2.2 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA	28
2.2.1 CICLO DIESEL	29
2.3 MOTORES ELÉTRICOS	35
2.3.1 MOTORES DE INDUÇÃO	37
2.3.2 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ESCOVAS	38
2.3.3 MOTORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES SEM ESCOVAS	38
2.3.4 MOTORES DE RELUTÂNCIA	39
3. TRÓLEBUS	40
3.1. HISTÓRICO	40
3.2. CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO TRÓLEBUS	41
3.3. PANORAMA GLOBAL E TECNOLOGIAS ATUAIS	43
4. MOBILIDADE URBANA	45
4.1 HISTÓRICO E CONTEXTO	45
4.2 DIRETRIZES PARA A MOBILIDADE URBANA	47
4.3 MOBILIDADE URBANA NO RIO DE JANEIRO	48
4.4 O MODELO BRT	50
4.5 O SISTEMA BRT NO RIO DE JANEIRO	52
5. METODOLOGIA	58
5.1. FONTE DOS DADOS	58
5.2. CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS	58
5.3. LIMITAÇÕES DOS DADOS	63
5.4. PARÂMETROS DE EMISSÃO DA FERRAMENTA REFROTA	64
5.5. PARÂMETROS DA FROTA	64
5.5.1. PARÂMETROS COMUNS AOS DOIS CENÁRIOS	64
5.5.2. PARÂMETROS ESPECÍFICOS DO CENÁRIO BRT MOVIDO A DIESEL	65
6. ANÁLISE DE DADOS	67
6.1. ANÁLISE AMBIENTAL	68
6.1.1. CENÁRIO ATUAL: BRT MOVIDO A DIESEL	68
6.1.1.1. EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	68
6.1.1.2. EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO (MP)	69
6.1.1.3. EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO _x)	70
6.1.2. CENÁRIO ALTERNATIVO: TRÓLEBUS	71
6.2. ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO	72
6.2.1. CENÁRIO ATUAL: BRT MOVIDO A DIESEL	72

6.2.2. CENÁRIO ALTERNATIVO: TRÓLEBUS	73
7. DISCUSSÃO	75
7.1. ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS.....	75
7.2. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO	76
8. CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

1.1. MOTIVAÇÃO

As emissões de gases de efeito estufa provenientes do setor de transportes representam, em escala global, uma das principais fontes de poluição atmosférica. No âmbito desse setor, o modal rodoviário se sobressai como o maior contribuinte, em grande parte devido à intensa dependência de combustíveis fósseis por automóveis particulares, caminhões e ônibus. No contexto brasileiro, o sistema de *Bus Rapid Transit* (BRT) implementado na cidade do Rio de Janeiro, embora represente um avanço em termos de mobilidade urbana, utiliza veículos movidos a diesel, ocasionando em uma contribuição significativa para as emissões de gases de efeito estufa e outros poluentes atmosféricos, especialmente na região metropolitana.

1.2. JUSTIFICATIVA

Considerando os desafios impostos pelas mudanças climáticas e de promover o bem-estar da população carioca, surge a necessidade buscar soluções sustentáveis que alinhem eficiência operacional à responsabilidade ambiental. Dentre as tecnologias viáveis para o transporte coletivo urbano, os trólebus, ônibus elétricos alimentados por rede aérea, despontam como uma alternativa promissora. Com presença consolidada em diversas cidades ao redor do mundo, essa tecnologia tem demonstrado bons resultados por não gerar emissões locais de poluentes e por contribuir para a diminuição da poluição sonora, reduzindo o ruído em cerca de 50% em comparação aos ônibus convencionais (UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS, 2025) (ELETRA, 2025). Ademais, seu funcionamento é compatível com a realidade energética brasileira, cuja matriz energética é majoritariamente composta por fontes renováveis, o que amplia ainda mais os benefícios ambientais associados à sua adoção.

A análise feita nesse estudo visa avaliar o impacto ambiental desta substituição tecnológica, fornecendo subsídios técnicos para tomadas de decisão no planejamento da mobilidade urbana sustentável do Rio de Janeiro, alinhando-se aos compromissos ambientais nacionais e internacionais, e podendo estabelecer um precedente para outras metrópoles brasileiras na eletrificação de seus sistemas de transporte público.

1.3. OBJETIVOS

Analisar o impacto ambiental, energético e econômico da substituição da frota movida a diesel do sistema BRT do Rio de Janeiro por trólebus, com base na estimativa de emissões atmosféricas.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho adota uma abordagem quantitativa e comparativa, fundamentada na comparação entre dois cenários: o atual, com veículos a diesel, e o proposto, com trólebus. A metodologia utilizou como base a ferramenta ReFrota, desenvolvida pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), para estimar as emissões de gases de efeito estufa e de poluentes locais das frotas dos ônibus públicos (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021).

Com base nos resultados obtidos pela ferramenta ReFrota, será realizada uma análise comparativa dos principais poluentes emitidos, como dióxido de carbono (CO_2), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x). A comparação permitiu estimar o potencial de redução de emissões que seria alcançado com a substituição da frota atual a diesel por uma frota eletrificada. Os percentuais de redução foram calculados com base nas emissões totais anuais, considerando os mesmos parâmetros operacionais em todos os cenários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AS EMISSÕES DE POLUENTES

As mudanças climáticas consolidaram-se como uma das questões mais urgentes do século XXI, exigindo respostas imediatas e coordenadas em escala global. Impulsionadas principalmente pelas atividades humanas, as emissões contínuas de gases de efeito estufa (GEE), como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), elevaram a temperatura média global em aproximadamente $1,5^\circ\text{C}$ em relação aos níveis pré-industriais (1850–1900), conforme mostra a figura 1 (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA, 2023). Esse aquecimento vem provocando transformações rápidas e abrangentes na atmosfera, nos oceanos, na criosfera e nos ecossistemas terrestres, comprometendo o equilíbrio climático do planeta.

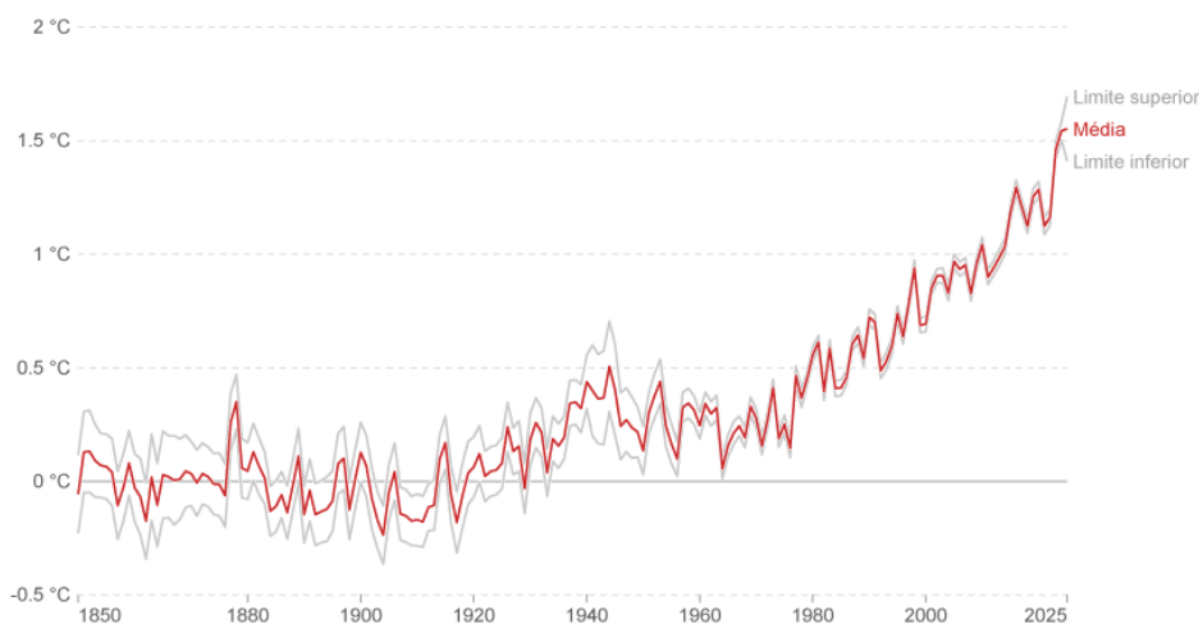


Figura 1: Variação da temperatura média global da superfície terrestre.

Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2025.

A elevação nas concentrações atmosféricas de GEE está diretamente relacionada a padrões insustentáveis de produção e consumo, à queima de combustíveis fósseis, ao desmatamento, às mudanças no uso da terra e às práticas agrícolas intensivas. Atualmente, os níveis de CO_2 , CH_4 e N_2O encontram-se em constante elevação, um processo que se intensificou ainda mais nas últimas décadas, alcançando os valores mais altos dos últimos 800 mil anos, de acordo com registros paleoclimáticos (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA, 2023).

Diante desse cenário, a partir da década de 1970, a crescente conscientização sobre os impactos ambientais fez com que essas questões ocupassem espaço nas agendas políticas globais. Esse movimento impulsionou a construção de uma resposta coordenada pela comunidade internacional e a formulação de acordos multilaterais voltados para a contenção do aquecimento global, resultando em marcos

históricos, como a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92), a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), o Protocolo de Kyoto (1997) e, posteriormente, o Acordo de Paris (2015). Este último estabeleceu como meta limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C, com esforços para restringi-lo a 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Além disso, o acordo introduziu o mecanismo das Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, na sigla em inglês), que orienta os compromissos voluntários de mitigação de emissões de cada país signatário.

O Brasil, como parte do Acordo de Paris, atualizou sua NDC em 2024, adotando metas mais ambiciosas. O país comprometeu-se a reduzir entre 59% e 67% suas emissões líquidas de gases de efeito estufa até 2035, em comparação aos níveis de 2005, estabelecendo um teto de emissões entre 850 milhões e 1,05 bilhão de toneladas de CO₂ equivalente naquele ano (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2024). Além disso, reafirmou o objetivo de alcançar a neutralidade climática até 2050. Para atingir esses compromissos, o país definiu estratégias que envolvem a transição energética, o fortalecimento do transporte urbano sustentável, a conservação florestal e a gestão sustentável dos resíduos sólidos e da agropecuária.

Nesse contexto, compreender a dinâmica dos gases de efeito estufa (GEE), sua origem, comportamento e impacto climático torna-se fundamental para embasar as discussões sobre as estratégias de mitigação e adaptação necessárias à contenção da crise climática.

2.1.1 OS GASES DE EFEITO ESTUFA

Os Gases de Efeito Estufa (GEE) são componentes gasosos presentes na atmosfera que contribuem para o efeito estufa, fenômeno natural e essencial para a manutenção da vida na Terra, pois permite que o planeta retenha parte da radiação térmica proveniente do Sol. Desde a Revolução Industrial, contudo, a intensificação das atividades humanas tem elevado significativamente a concentração desses gases, agravando o desequilíbrio climático e impulsionando o aquecimento global.

Embora o dióxido de carbono (CO₂) seja o principal gás responsável pelo aquecimento global, outros gases como o metano (CH₄), o óxido nitroso (N₂O) e os chamados gases fluorados (HFCs, PFCs e SF₆) também exercem efeitos consideráveis no desequilíbrio climático. Esses gases se diferenciam quanto às suas fontes emissoras, tempo de permanência na atmosfera e capacidade de reter calor, fatores que determinam seu impacto climático.

Para viabilizar a comparação entre os diferentes GEE, foi desenvolvida a métrica denominada Potencial de Aquecimento Global (GWP, do inglês Global Warming Potential) (PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA, 2023). Essa métrica expressa a capacidade de um gás reter calor na atmosfera em relação ao dióxido de carbono, que é utilizado como referência, com valor igual a 1.

A medida mais amplamente adotada é o GWP-100, que considera o impacto cumulativo de cada gás ao longo de um período de 100 anos. Essa padronização permite converter os diferentes GEE em unidades equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e), facilitando o monitoramento das emissões e possibilitando análises

comparativas de longo prazo, fundamentais para a formulação e avaliação de políticas climáticas. A figura 2 ilustra os principais gases e seus respectivos valores de GWP.

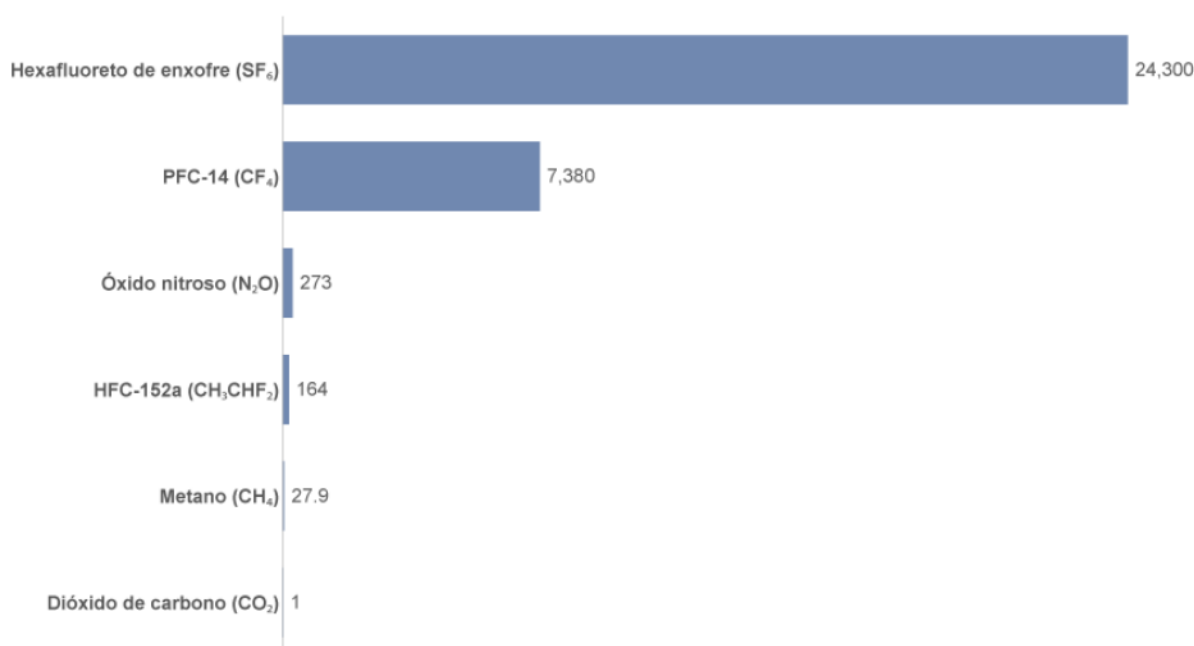


Figura 2: Potencial de aquecimento global (GWP-100) de gases de efeito estufa em relação ao CO₂.

Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2023.

2.1.2 PANORAMA GLOBAL

Em um cenário global marcado pela crescente industrialização e integração econômica, a demanda por energia ocupa posição central no desenvolvimento e na manutenção das atividades econômicas. Fundamental para setores como o transporte, a indústria, a geração de eletricidade e o aquecimento; a energia é um pilar essencial para a qualidade de vida moderna. No entanto, a forma como essa energia é produzida determina, em grande medida, o volume e a composição dos gases de efeito estufa lançados na atmosfera.

A análise da matriz energética global revela uma dependência histórica de fontes não renováveis. Conforme ilustrado no gráfico 3, entre 1965 e 2023, o carvão, o petróleo e o gás natural corresponderam, em média, por cerca 80% do consumo energético mundial. Embora o carvão tenha predominado nas décadas iniciais, o petróleo consolidou-se como principal fonte a partir da segunda metade do século XX, acompanhado do crescimento expressivo do gás natural nas últimas décadas. Em conjunto, essas três fontes constituem a base estrutural da matriz energética contemporânea.

As demais fontes de energia são compostas por fontes de baixa emissão de carbono, como a energia hidrelétrica, cuja participação é a mais consolidada. Destacam-se também as fontes solar e eólica que, apesar do crescimento acelerado nos últimos anos, ainda representam uma parcela relativamente modesta da matriz energética. Além disso, a energia nuclear mantém uma contribuição estável ao longo do tempo. A transição para uma matriz energética mais sustentável, embora em curso,

avança de maneira gradual, refletindo a complexidade e a resistência do sistema energético global diante de mudanças estruturais aceleradas.

Ademais, a trajetória das emissões é diretamente influenciada por eventos globais. Conforme evidenciado na figura 3, observou-se uma redução pontual no consumo energético em 2009, decorrente da crise financeira internacional que impactou a atividade econômica em escala global. Episódio semelhante ocorreu em 2020, quando a pandemia de COVID-19 provocou uma desaceleração econômica ainda mais acentuada. Tal impacto é perceptível em todos os indicadores analisados, que apresentam mudanças significativas nas tendências no entorno desse período. Contudo, com a retomada das atividades econômicas, os níveis de emissões voltaram gradualmente à trajetória de crescimento anteriormente observada.

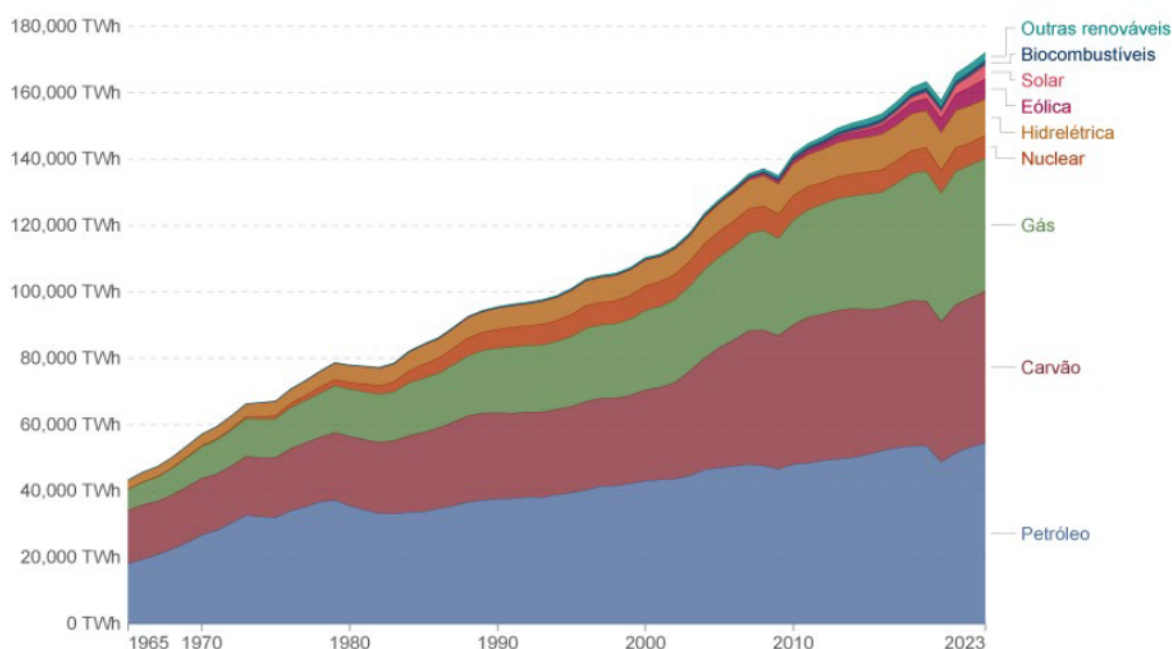


Figura 3: Consumo global de energia primária por fonte.
Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2024.

A predominância de fontes fósseis na matriz energética global reflete-se diretamente no crescimento contínuo das emissões de GEE. Conforme demonstra a figura 4, as emissões globais líquidas aumentaram de 37,8 GtCO₂e para 57,1 GtCO₂e entre 1990 e 2023, representando um crescimento superior a 50% em pouco mais de três décadas. Este é o nível mais alto já registrado, e o crescimento persistente das emissões indica que, apesar de esforços internacionais, as políticas climáticas vigentes têm se mostrado insuficientes para reverter essa tendência.

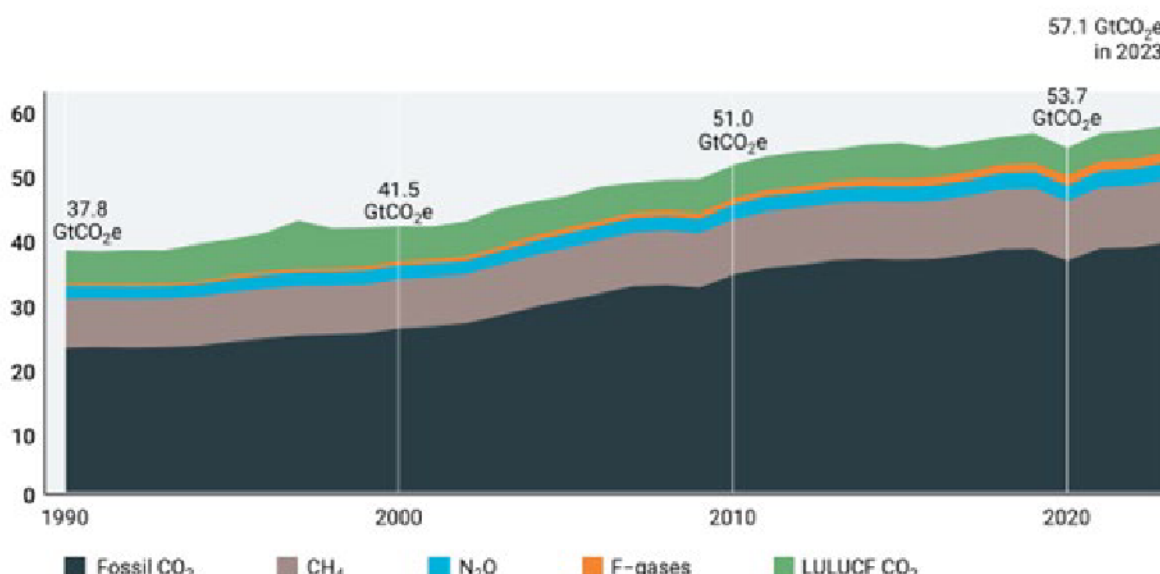


Figura 4: Emissões globais totais de GEE entre 1990 e 2023 (GtCO₂e/ano).
Fonte: UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME, 2024.

Em 2023, aproximadamente 39,8 GtCO₂ foram provenientes exclusivamente ao dióxido de carbono, correspondendo a cerca de 70% das emissões globais totais de GEE. Esse dado reforça o papel central do CO₂ como principal agente impulsionador do aquecimento global. Outros gases também contribuem para esse cenário: o metano (CH₄) representa cerca de 17%, o óxido nitroso (N₂O) responde por 6%, e os gases industriais, como HFCs, PFCs e SF₆, somam aproximadamente 2%, embora apresentem potenciais de aquecimento global significativamente mais elevados. Ademais, as emissões líquidas provenientes de mudanças no uso da terra e florestas (LULUCF) completam o quadro, representam cerca de 5% do total.

Ao analisar o cenário global de emissões de gases de efeito estufa, é fundamental destacar o papel relativo das principais economias mundiais. Em 2023, o Brasil foi responsável por aproximadamente 1,30 GtCO₂e, o que corresponde a 2,5% das emissões globais, posicionando-se como o sexto maior emissor, atrás de China, Estados Unidos, Índia, União Europeia e Rússia. Com exceção da China, que apresentou um crescimento expressivo de suas emissões nas últimas décadas, os demais grandes emissores exibem trajetórias mais estáveis ou mesmo decrescentes ao longo do tempo.

Conforme ilustrado na figura 5, que apresenta as emissões anuais dos principais emissores entre 1990 e 2023, observa-se a inclusão de faixas sombreadas ao redor de cada linha principal para representar a incerteza estatística associada às medições. Essas faixas indicam as margens de erro decorrentes de diferenças metodológicas entre os inventários nacionais e estimativas independentes.

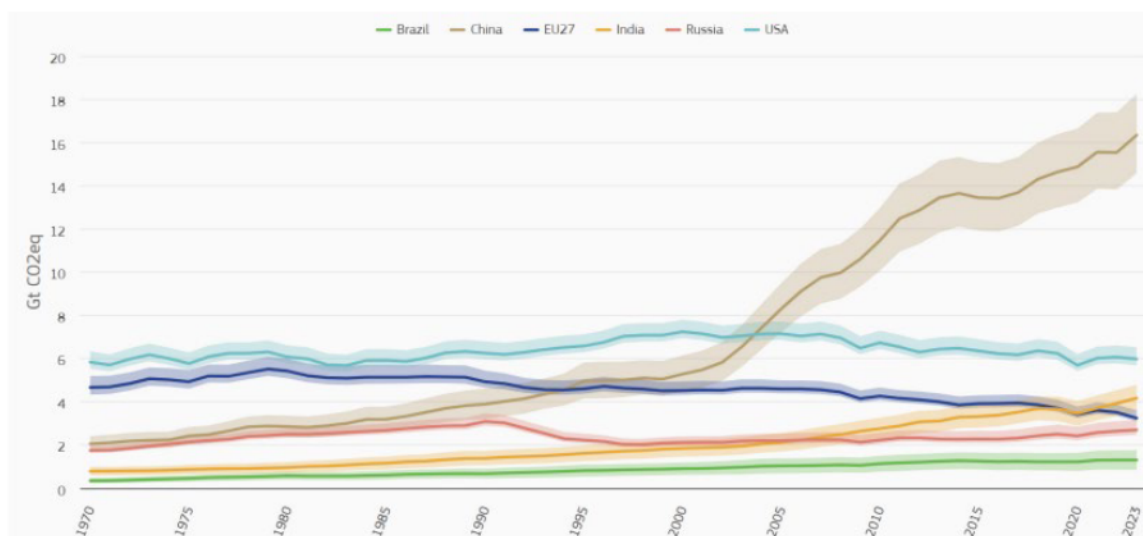


Figura 5: Emissões globais de GEE por país.
Fonte: JOINT RESEARCH CENTRE, 2024.

2.1.3 PANORAMA BRASILEIRO

Apesar de sua posição de destaque entre os maiores emissores globais, o Brasil apresenta uma dinâmica energética distinta em relação às principais economias. Enquanto em muitos países desenvolvidos as emissões de GEE estão fortemente associadas ao consumo de fontes não renováveis, o Brasil se diferencia pela elevada participação de fontes renováveis em sua matriz energética.

De acordo com a figura 6, entre as fontes não renováveis, o petróleo permanece como o principal insumo energético no país, representando aproximadamente 36% do consumo total, seguido pelo gás natural e pelo carvão mineral. Em contrapartida, as fontes renováveis ocupam um espaço significativo. A principal fonte renovável é a energia hidrelétrica, que representa cerca de 30% do consumo total, reflexo da ampla disponibilidade de recursos hídricos e de décadas de investimentos na expansão da capacidade instalada. As fontes eólica e solar, embora ainda representem fatias menores, vêm apresentando crescimento acelerado alcançando juntas cerca de 11% da matriz energética nacional, seguindo a tendência mundial de expansão das energias renováveis. Já os biocombustíveis, como etanol e biodiesel, também desempenham um papel relevante, somando aproximadamente 7% do total.

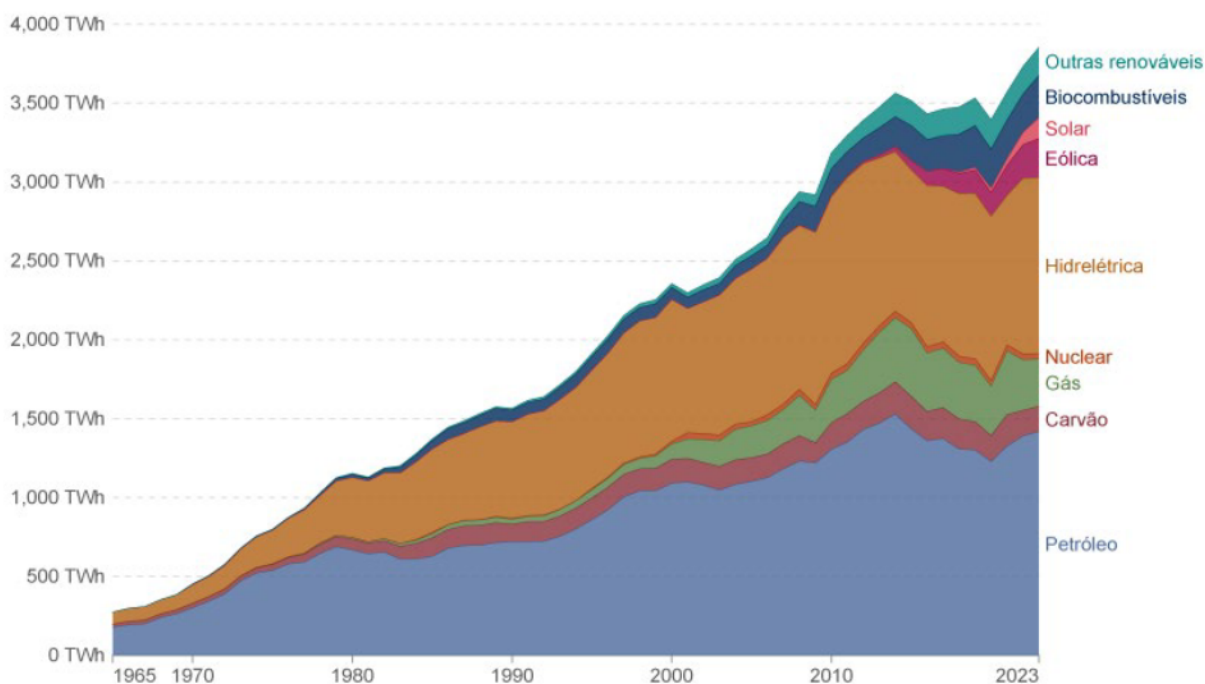


Figura 6: Consumo de energia primária no Brasil por fonte.
Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2024.

Em contraste com o cenário global, ilustrado na figura 3, em 2023, cerca de 85% da energia consumida mundialmente era proveniente de fontes fósseis, enquanto no Brasil esse percentual foi de aproximadamente 50%, conforme ilustrado na figura 6. Por outro lado, enquanto as fontes renováveis representaram apenas 15% da matriz energética global, no Brasil elas corresponderam a cerca de 50%. Esses dados evidenciam a menor dependência brasileira de combustíveis fósseis e reforçam o papel estratégico da matriz energética nacional na mitigação das emissões de gases de efeito estufa.

Apesar dessa vantagem relativa, o Brasil enfrenta desafios no controle de suas emissões totais de gases de efeito estufa. A figura 7 apresenta a distribuição das emissões líquidas brasileiras por tipo de gás ao longo dos últimos anos.

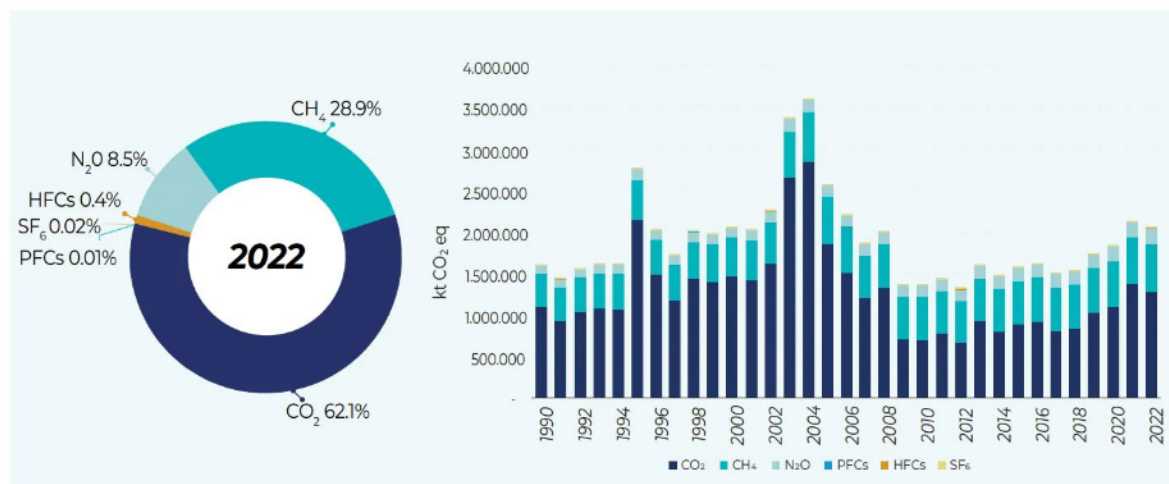


Figura 7: Emissões líquidas brasileiras por GEE.
Fonte: MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2024.

A análise evidencia que o dióxido de carbono (CO₂) constitui o principal gás emitido pelo Brasil, representando, em 2022, 62,1% das emissões líquidas totais de gases de efeito estufa. Em seguida, destaca-se o metano (CH₄), com participação de 28,9%, e o óxido nitroso (N₂O), com 8,5%. Em comparação à média global, observa-se no Brasil uma proporção relativamente mais elevada de emissões de metano, aspecto relacionado à expressiva atividade agropecuária e à dinâmica de mudanças no uso da terra. Juntas, essas atividades responderam por aproximadamente 70% do total das emissões brasileiras em 2022.

A série histórica revela um padrão de crescimento contínuo das emissões até o ano de 2004, seguido por um período de tendência de redução até 2010 (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2024). Após um intervalo de relativa estabilidade, verifica-se uma retomada no aumento das emissões a partir de 2018. Destaca-se que a redução das emissões totais observada após 2005 está diretamente associada às transformações ocorridas no setor de uso da terra, mudanças no uso da terra e florestas (LULUCF).

O Brasil, caracterizado por sua vasta extensão territorial e diversidade ambiental e socioeconômica, apresenta uma distribuição heterogênea de fontes de emissão de gases de efeito estufa. Essa variedade de contextos regionais reflete dinâmicas distintas de uso da terra e atividades produtivas, resultando em padrões de emissão variados entre os estados, conforme ilustrado na figura 8.

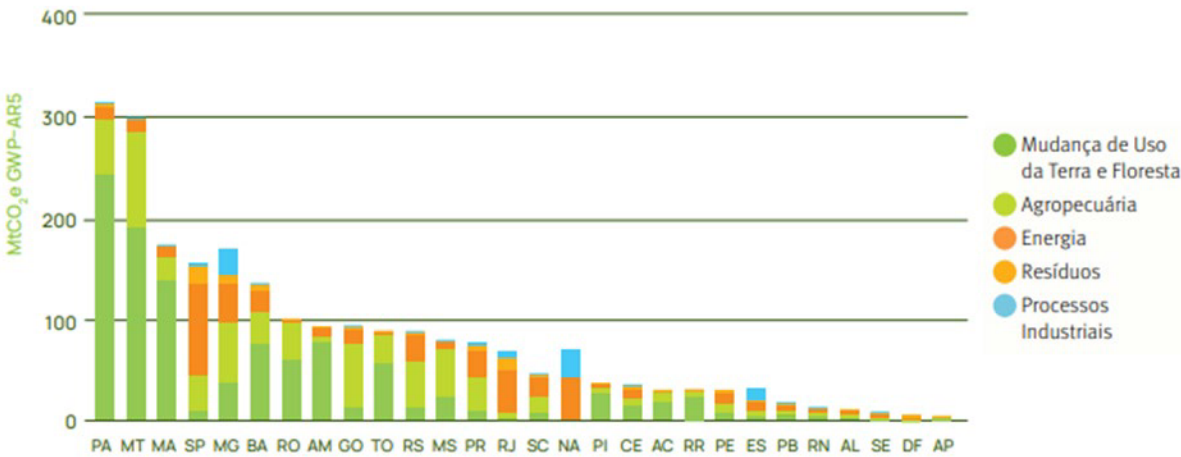


Figura 8: Emissões brutas de GEE por estado.
Fonte: Adaptado de SEEG, 2024.

Em 2023, os estados do Pará, Mato Grosso e Maranhão lideraram o ranking de emissões brutas de GEE no Brasil, impulsionados principalmente pelas atividades de mudanças de uso da terra e floresta e agropecuária. Em seguida, destacam-se os estados de São Paulo e Minas Gerais, com ênfase para as emissões oriundas dos setores de energia e de processos industriais. O estado do Rio de Janeiro ocupa a 14ª posição no ranking nacional de emissões por estado. No entanto, ao se analisar a escala municipal, o município do Rio de Janeiro figura como o quinto maior emissor de GEE entre todos os municípios brasileiros, conforme apresenta a tabela 1.

Tabela 1: Maiores municípios emissores de GEE no Brasil.
Fonte: Adaptado de SEEG, 2024.

Posição	Município	Mt CO ₂ e
1	São Félix do Xingu (PA)	25,298
2	Altamira (PA)	22,057
3	Porto Velho (RO)	17,577
4	São Paulo (SP)	14,472
5	Rio de Janeiro (RJ)	13,239

Entre os cinco principais emissores, observa-se uma diferença de perfil: enquanto os municípios da Região Norte, como São Félix do Xingu, Altamira e Porto Velho, têm suas emissões fortemente associadas à mudança no uso da terra, as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro refletem padrões urbanos, com destaque para as emissões dos setores de transportes, energia e resíduos sólidos urbanos. Essa diferença de perfil reforça a necessidade de se observar a evolução das emissões nos

grandes centros urbanos, onde os desafios e oportunidades de mitigação assumem contornos próprios.

A figura 9 apresenta a distribuição das emissões de gases de efeito estufa na cidade do Rio de Janeiro entre 2012 a 2021.

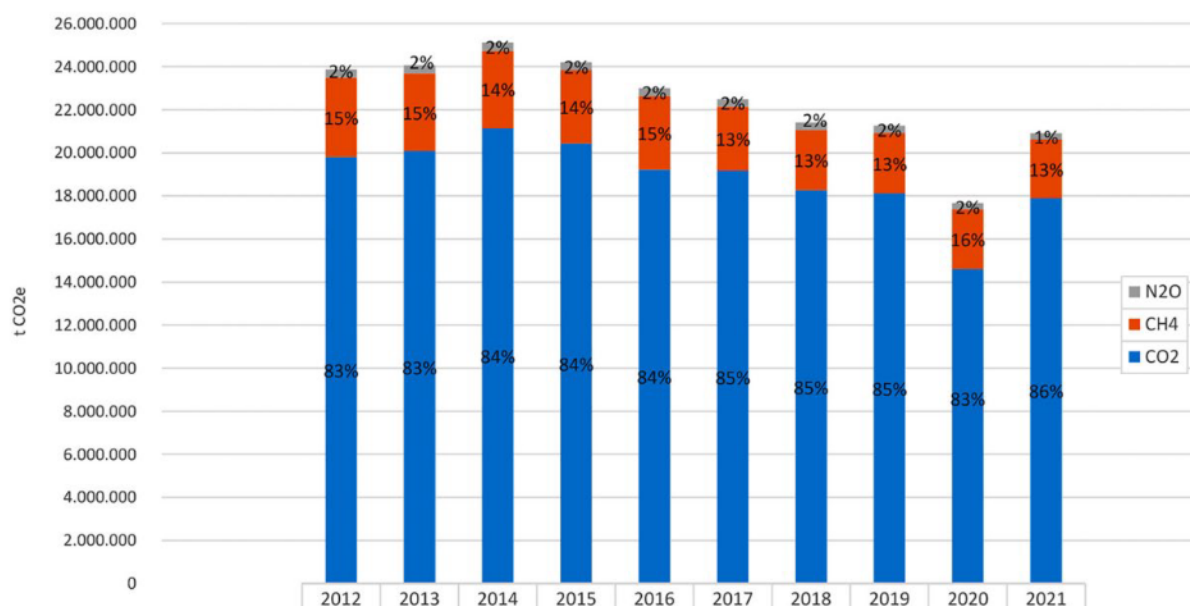


Figura 9: Emissões de GEE por tipo de gás no Rio de Janeiro.

Fonte: Adaptado de SISCLIMA, 2023.

A análise evidencia uma tendência de redução nas emissões totais ao longo dos anos. O dióxido de carbono (CO_2) destaca-se como o principal gás emitido, sendo responsável por mais de 80% das emissões em todos os anos considerados, um percentual ainda mais elevado do que a média observada no cenário global. O metano (CH_4) e o óxido nitroso (N_2O) contribuíram com parcelas menores, reforçando o teor urbano das emissões.

2.1.4 AS EMISSÕES DE GEE NO SETOR DE TRANSPORTE

O setor de transportes desempenha um papel central nas emissões de gases de efeito estufa, sendo responsável por uma parcela significativa em escala global. Sua relevância torna-se ainda mais evidente no contexto da crescente urbanização, que intensifica a demanda por mobilidade, sobretudo em centros densamente povoados. Nesse cenário, o transporte motorizado se destaca como um dos principais desafios à descarbonização das cidades.

A análise setorial das emissões, conforme apresentado na figura 10, evidencia a importância estratégica do setor de transportes no contexto das mudanças climáticas.

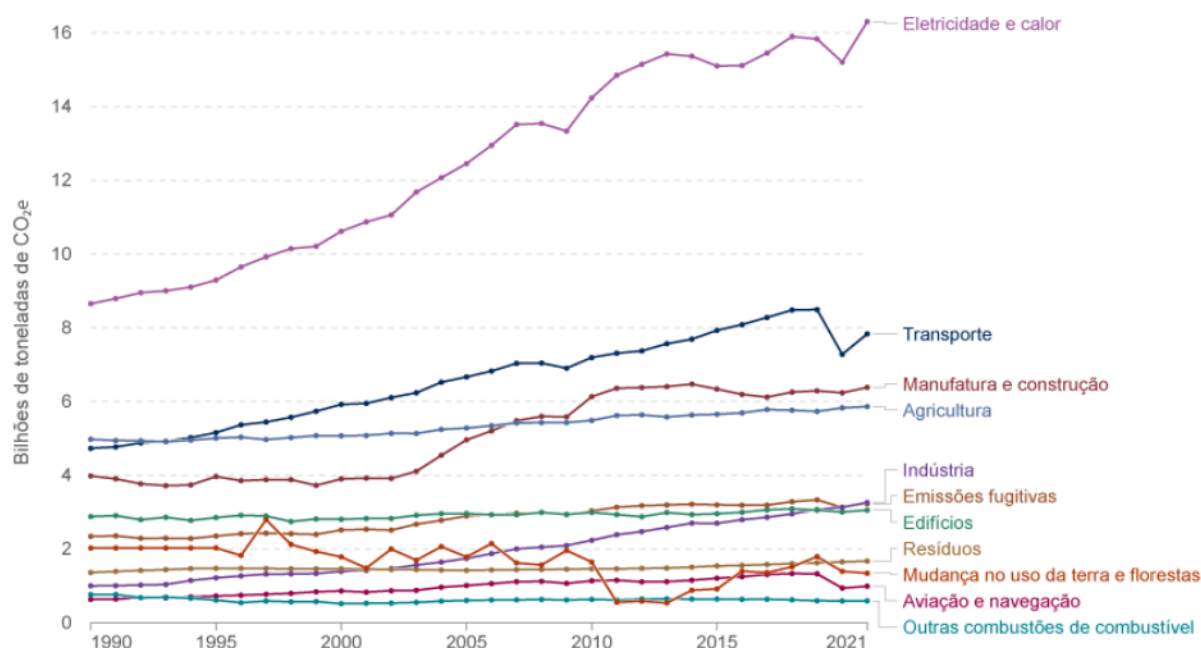


Figura 10: Emissões globais de GEE por setor.
Fonte: Adaptado de OUR WORLD IN DATA, 2024.

No cenário atual, o transporte ocupa a segunda posição entre os maiores emissores globais, ficando atrás apenas do setor de geração de eletricidade e aquecimento, com um aumento superior a 50% nas emissões desde 1990. Entre os modais, o transporte rodoviário destaca-se como o principal responsável pelas emissões, tanto pelo número expressivo de veículos em circulação quanto pela elevada dependência de combustíveis fósseis, como gasolina e diesel.

No Brasil, de acordo com a figura 11, a análise das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes entre 1990 e 2022 confirma a predominância do transporte rodoviário como principal fonte emissora. Esse modal concentrou a maior parte do total de emissões liberados ao longo de toda a série histórica, o que evidencia a forte dependência nacional por combustíveis fósseis desse modal. As demais subcategorias, que incluem o transporte ferroviário, aéreo, aquaviário e outros modais, apresentam participação marginal e pouca variação ao longo do tempo.

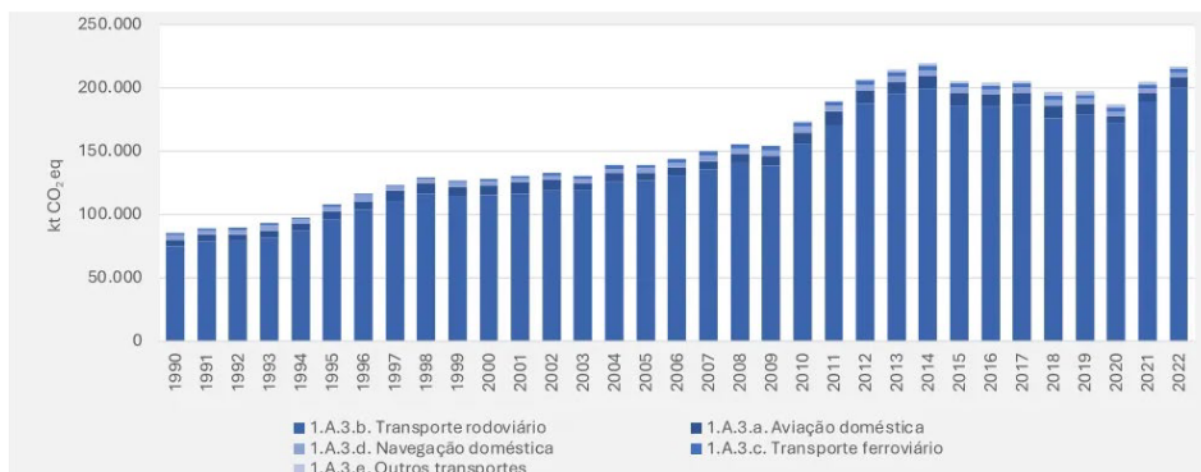


Figura 11: Emissões de GEE do setor de transporte no Brasil.
Fonte: MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES, 2024.

No caso do estado do Rio de Janeiro, a situação se agrava em razão de sua elevada densidade populacional e intensa atividade de mobilidade urbana, elementos que amplificam os desafios associados à gestão das emissões no setor de transportes. Por operarem com alta frequência em áreas densamente povoadas, os ônibus desempenham um papel crítico no contexto urbano, gerando impactos significativos sobre a qualidade do ar e a saúde pública.

A figura 12 apresenta a evolução das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂), em toneladas, no setor de transporte de passageiros por ônibus do estado do Rio de Janeiro entre 1998 e 2022.

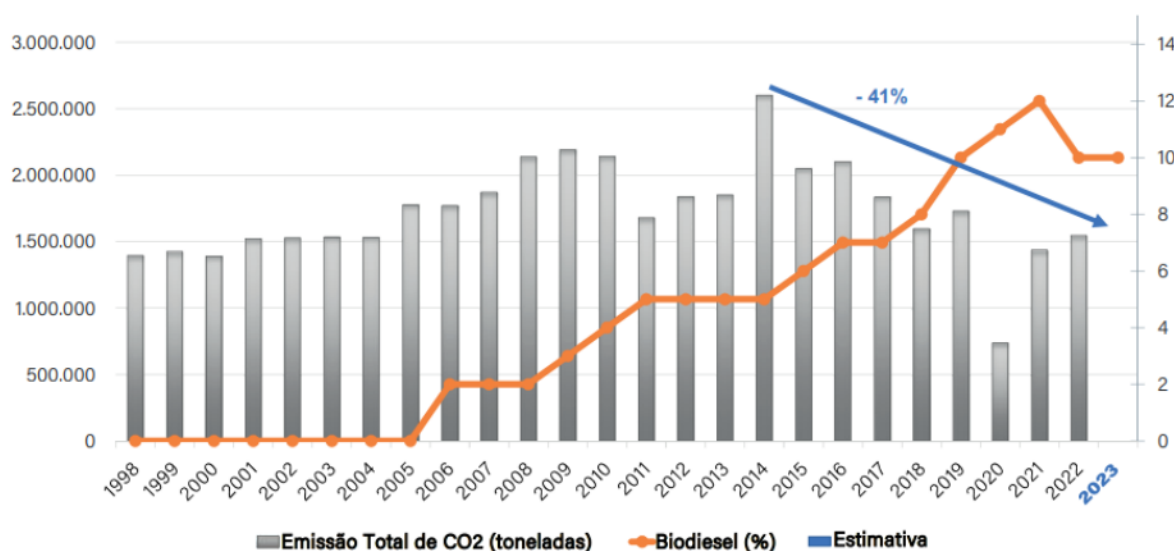


Figura 12: Emissões de CO₂ provenientes de ônibus no estado do Rio de Janeiro.
Fonte: SEMOVE, 2024.

A análise revela um crescimento nas emissões de CO₂ no setor de transportes até 2014, seguida por uma redução até o final do período analisado.

A redução das emissões, a partir de 2023, se deve, em parte, a renovação da frota, que tem sido acompanhada da introdução progressiva de veículos mais modernos, compatíveis com a norma Euro VI (PROCONVE P-8 no Brasil), que impõe limites mais rigorosos à emissão de poluentes atmosféricos (CASA CIVIL, 2023). Essa transição vem sendo apoiada pelo uso do diesel S10, de baixo teor de enxofre (10 mg/kg), misturado a 14% de biodiesel, o que contribui para a redução de emissões locais de material particulado, NO_x e compostos tóxicos. Tais características reforçam o potencial estratégico dos ônibus como vetores prioritários de mitigação e elementos-chave na transição energética do transporte coletivo urbano.

2.2 MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA

Segundo Martins (2006), máquinas térmicas são aquelas que transformam energia térmica em energia mecânica útil. Apesar de existirem diversas fontes de energia para a obtenção de calor, este trabalho se limitará em observar os motores cuja fonte de calor seja obtida através da queima de óleo diesel, para transformação da energia química em trabalho mecânico.

A energia química do combustível é liberada através da combustão da mistura combustível-comburente, de onde provém a energia térmica. Usualmente, utiliza-se o ar como comburente. O fluido ativo recebe a energia térmica transferida pela queima do combustível e fornece trabalho aos elementos do motor por meio de variações de pressão e volume.

Quanto ao comportamento do fluido ativo, os motores de combustão são classificados como do tipo de combustão interna, no qual o fluido ativo consiste nos produtos da combustão da mistura de ar-combustível; e do tipo de combustão externa, no qual o fluido ativo está plenamente separado da mistura ar-combustível. O calor proveniente dos produtos da combustão é transferido através das paredes de um reservatório ou caldeira.

Quanto à forma de se obter trabalho mecânico, os motores de combustão interna são classificados em:

- motores alternativos, quando o trabalho é obtido pelo movimento de oscilação de um pistão, transformado em rotação contínua por um sistema biela-manivela;
- motores rotativos, quando o trabalho é obtido diretamente por um movimento de rotação; e
- motores de impulso, quando o trabalho é obtido pela força de reação dos gases expelidos em alta velocidade pelo motor.

Quanto à ignição, os motores de combustão interna alternativos são classificados de acordo com a necessidade de haver algum agente que provoque o início da reação química do combustível com o ar no processo de combustão. Os motores de ignição por centelha ou motores ciclo Otto funcionam por meio de centelhamento através de velas de ignição. A mistura combustível-ar é admitida e, após ser comprimida, é inflamada por uma centelha provocada pelos eletrodos de uma vela. De maneira oposta, os motores de ignição espontânea ou Diesel não necessitam de velas de centelhamento. Nesse caso, somente o ar é admitido. Em seguida, o ar é comprimido pelo pistão de modo que atinja uma temperatura alta o suficiente para assegurar que o combustível reaja de forma espontânea, sem a necessidade de uma centelha (BRUNETTI, 2018).

Quanto ao número de tempos do ciclo de operação, que demonstra a sucessão de processos sofridos pelo fluido ativo ao longo do curso do pistão, os motores de combustão interna alternativos são classificados em:

- dois tempos, quando o ciclo se completa com somente dois cursos do pistão, constituindo uma única volta do eixo do motor; e
- em 4 tempos, quando o ciclo se completa com quatro cursos do pistão, constituindo duas voltas do eixo do motor.

As análises feitas neste trabalho terão como ênfase os motores de combustão interna do tipo alternativo por ignição espontânea (Diesel) a quatro tempos.

2.2.1 CICLO DIESEL

O motor ciclo Diesel é apresentado esquematicamente com os principais componentes em destaque, que podem ser vistos através da sua vista lateral, figura 13, e sua respectiva vista frontal, figura 14:

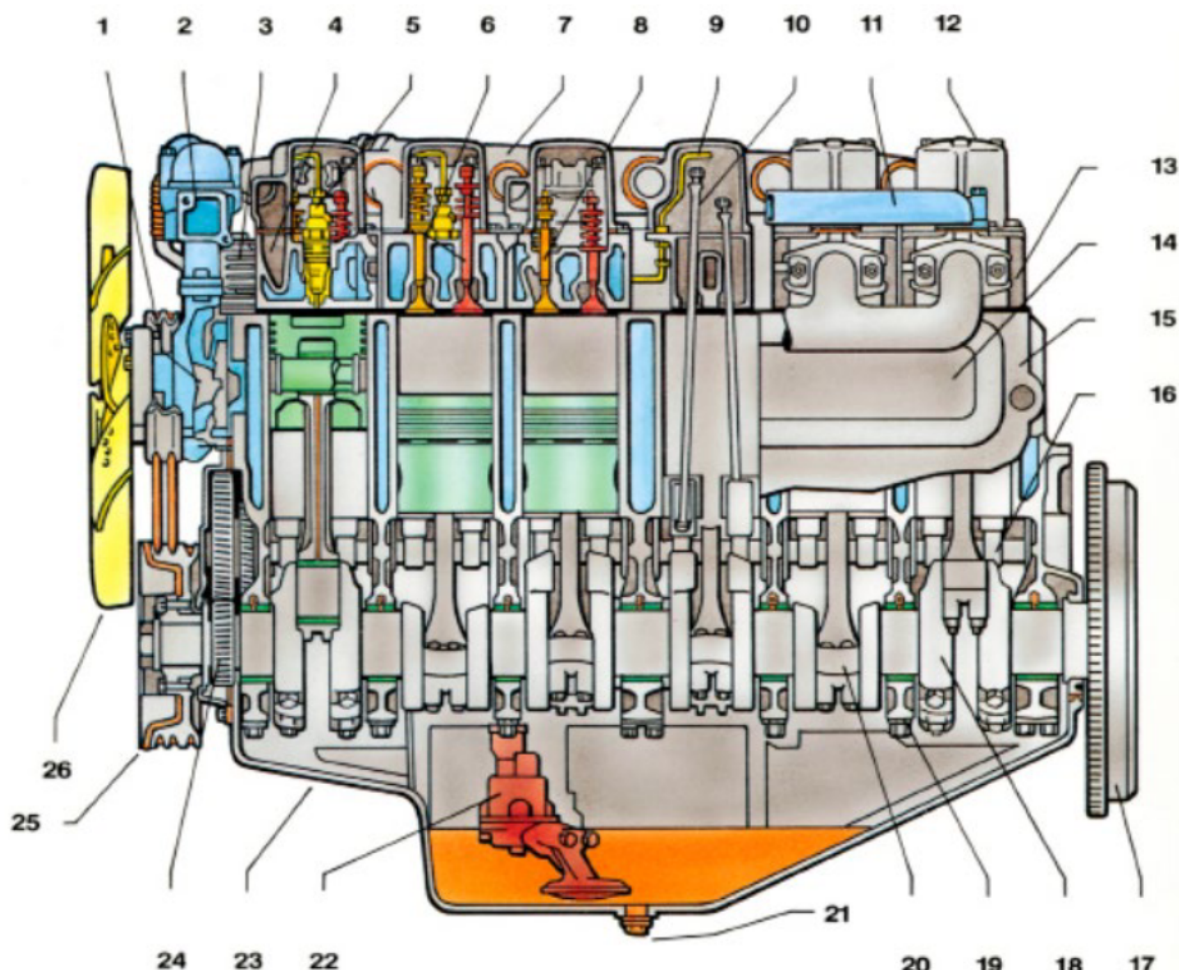


Figura 13: Vista lateral dos componentes de um motor de combustão interna.

Fonte: MAHLE, 2019.

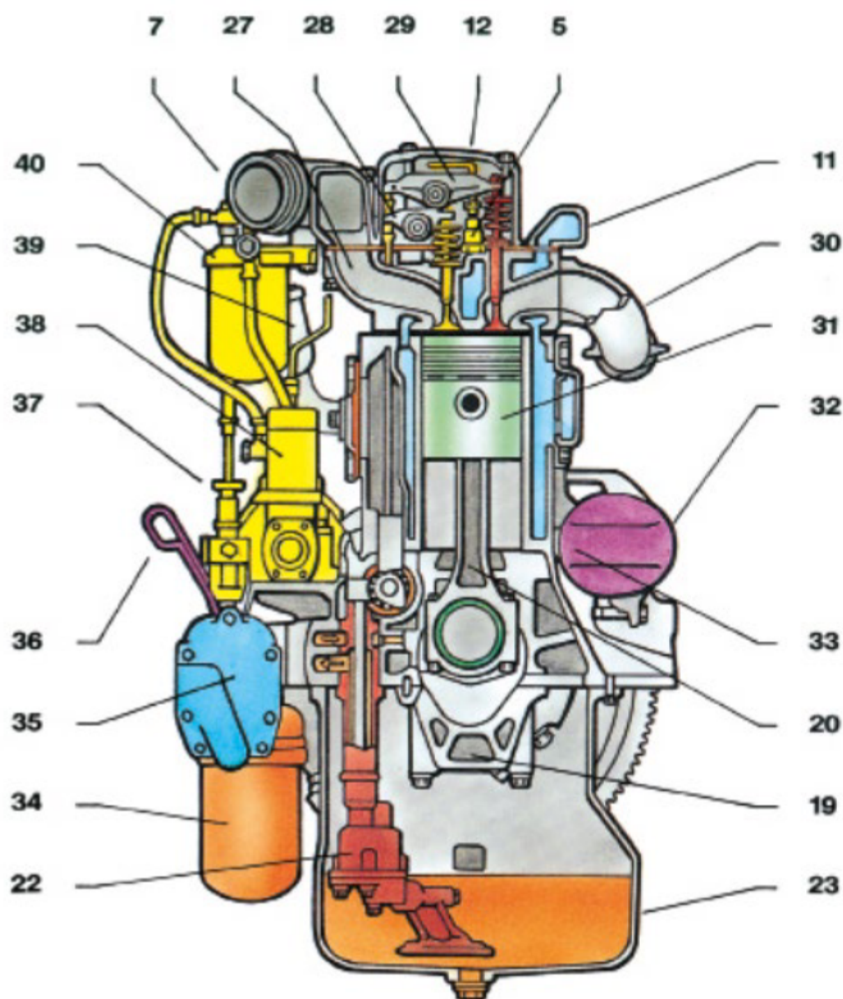


Figura 14: Vista frontal dos componentes de um motor de combustão interna.
Fonte: MAHLE, 2019.

A indicação de cada componente observado nas figuras 1 e 2 é apresentada na tabela 2, que enumera os principais componentes de um motor Diesel.

Tabela 2: Lista dos componentes de um motor de combustão interna.
Fonte: MAHLE, 2019.

1	Bomba-d'água	11	Duto de saída de água de refrigeração	21	Bujão de escoamento do óleo do cárter	31	Pistão
2	Válvula termostática	12	Tampa de válvula	22	Bomba de óleo	32	Motor de partida
3	Compressor de ar	13	Cabeçote	23	Cárter	33	Dreno da água de refrigeração
4	Duto de admissão	14	Tampa lateral do bloco	24	Engrenagem do eixo virabrequim	34	Filtro de óleo
5	Bico injetor	15	Bloco do motor	25	Polia anti-vibradora	35	Radiador de óleo
6	Válvula de escape	16	Eixo comando de válvulas	26	Hélice	36	Vareta indicadora do nível de óleo
7	Coletor de admissão	17	Volante	27	Duto de admissão tangencial	37	Bomba manual de combustível
8	Válvula de admissão	18	Eixo virabrequim	28	Balancim da válvula de admissão	38	Bomba injetora
9	Linha de injeção de combustível	19	Capa do mancal principal	29	Balancim da válvula de escape	39	Respiro do cárter
10	Vareta de válvula	20	Biela	30	Coletor de escape	40	Filtro de combustível

Quanto aos componentes, os motores são divididos em componentes estacionários e componentes móveis.

De acordo com a figura 15, os principais componentes estacionários são: bloco, cárter e cabeçote.

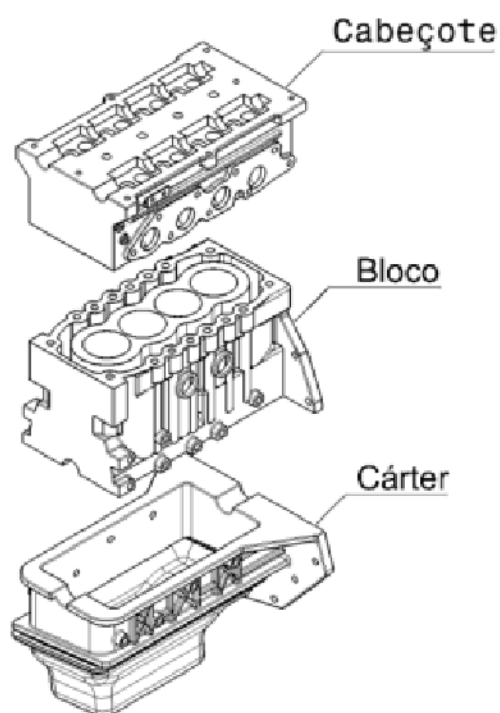


Figura 15: Componentes estacionários do motor.
Fonte: SOUZA, 2016.

O bloco constitui a principal estrutura do motor, no qual estão localizados os cilindros ou os furos para a colocação das camisas. O cárter é uma tampa que atua abaixo do bloco; protege os componentes inferiores do motor e é responsável por armazenar o óleo lubrificante. Por fim, o cabeçote atua acima do bloco; serve de tampa dos cilindros e suporta o conjunto de válvulas.

De acordo com a figura 16, os principais componentes que compõem o conjunto móvel do motor são: virabrequim, biela, pistão e válvulas de admissão e exaustão.

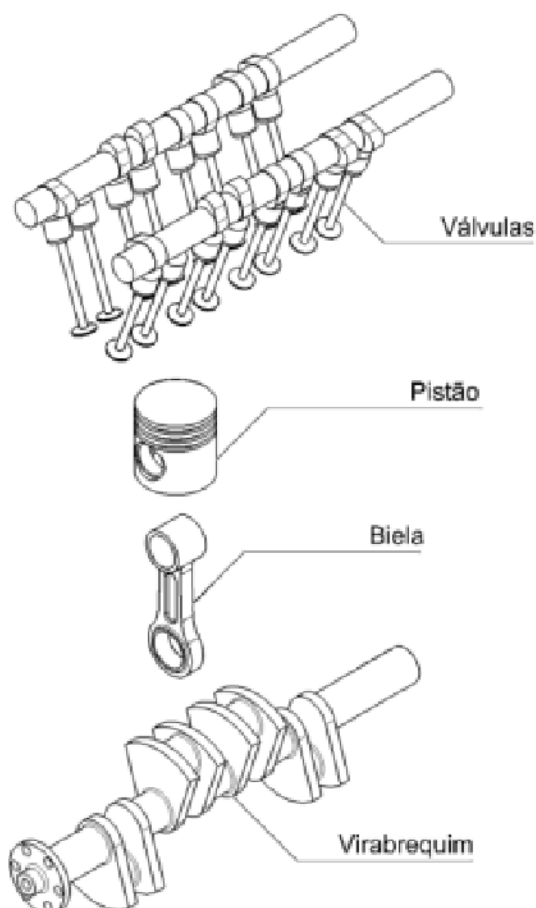


Figura 16: Componentes móveis do motor.
Fonte: SOUZA, 2016.

O sistema descrito na figura 17 composto por pistões, bielas e virabrequim serve para transformar a energia gerada pela combustão da mistura ar-combustível, admitida através das válvulas, em energia mecânica útil. O pistão executa um movimento alternativo linear, que é transformado em movimento rotativo pelo sistema biela-virabrequim.

No interior do cilindro o pistão alterna entre duas posições fixas chamadas de ponto morto superior (PMS) – a posição do pistão quando ele forma o menor volume no cilindro –, e o ponto morto inferior (PMI) – a posição do pistão quando ele forma o maior volume no cilindro. A distância entre o PMS e o PMI é a maior distância que o pistão pode percorrer em uma direção, e é chamada de curso do motor.

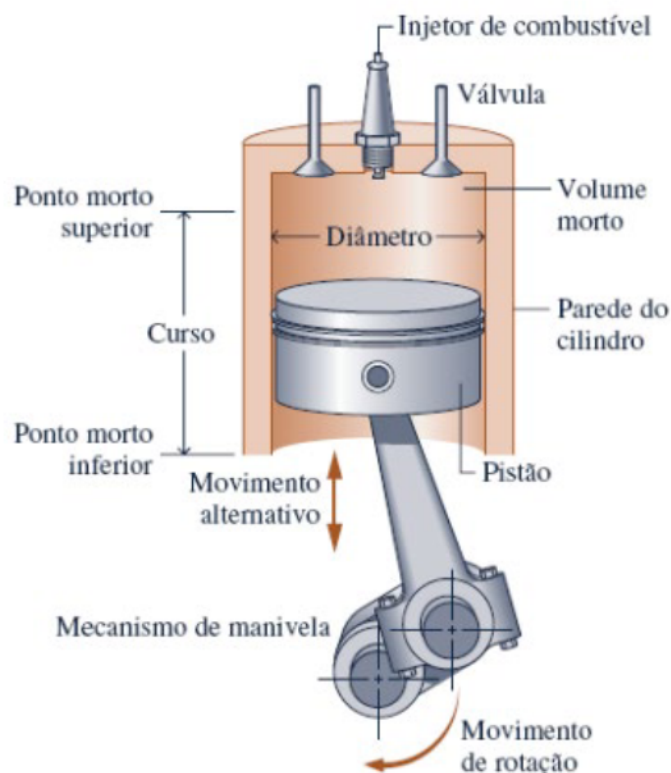


Figura 17: Nomenclatura para motores alternativos cilindro-pistão.
Fonte: MORAN, SHAPIRO, et al., 2018.

Para dar início ao movimento do motor, quando é acionado a partida, um motor elétrico (de arranque), alimentado pela bateria, inicia o movimento de rotação do virabrequim. O pistão e a biela, uma vez que estão ligados ao virabrequim, entram em movimento alternativo, dando início ao ciclo de funcionamento do motor a combustão interna, onde a mistura ar-combustível é queimada por compressão no interior dos cilindros de volume variável produzindo energia térmica que será convertida em trabalho (FILHO, 1983).

No interior do cilindro de um motor de 4 tempos a diesel ocorre uma sequência de operações sucessivas pelo fluido ativo para a obtenção de trabalho útil. Após o pistão percorrer o curso por quatro vezes, isto é, em duas idas e vindas do PMS ao PMI, que correspondem a duas voltas do virabrequim do motor, completa-se o ciclo. Os quatro tempos - admissão, compressão, combustão e exaustão - são descritos na figura 18:

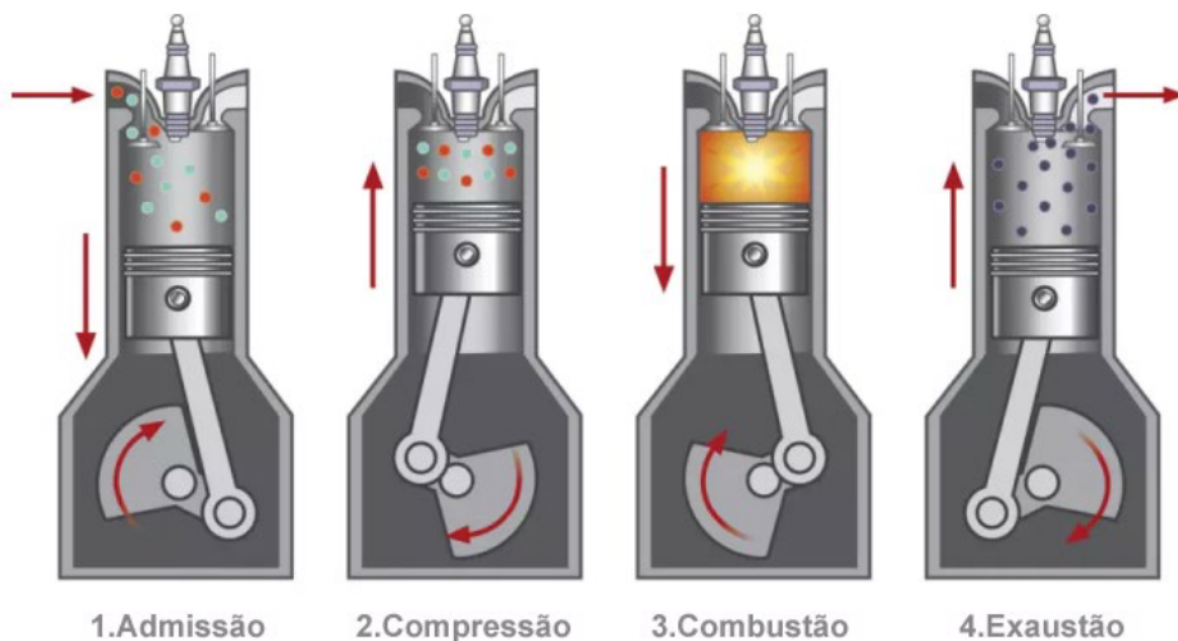


Figura 18: Os quatro tempos do motor alternativo ciclo Diesel.
Fonte: Adaptado de AIRBUS, 2020.

2.3 MOTORES ELÉTRICOS

O motor elétrico é o componente destinado a transformar energia elétrica em mecânica útil para propulsionar o veículo. Na figura 19, é descrito os principais modelos de motores elétricos.



Figura 19: Diagrama com os principais modelos de motores elétricos.
Fonte: Adaptado de WEG, 2021.

Todos esses tipos de motores compartilham os mesmos quatro componentes básicos de operação: (1) estator (enrolamentos estacionários), (2) rotor (enrolamentos rotativos), (3) rolamentos e (4) estrutura (invólucro), conforme a figura 20.

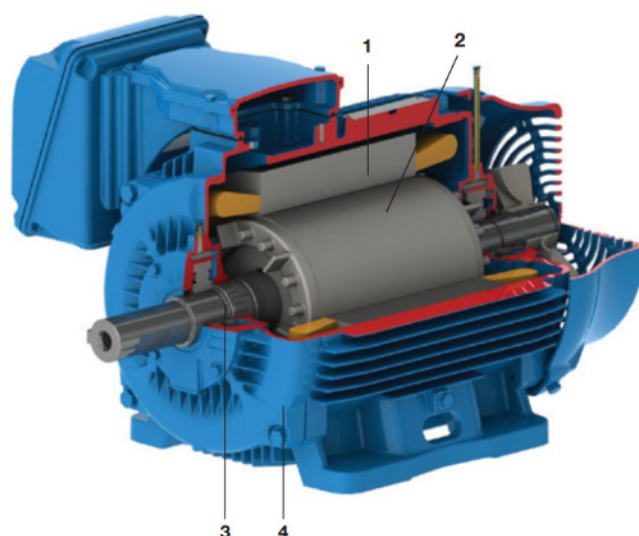


Figura 20: Vista dos componentes de um motor elétrico.
Fonte: WEG, 2021.

Em princípio, qualquer motor elétrico pode ser utilizado para esta finalidade, contanto que se faça um controle do torque e velocidade que será entregue ao eixo do veículo. No entanto, para que se atenda aos requisitos mínimos de um veículo elétrico, segundo Zhu (2007), o motor precisa ter:

- Alta densidade de torque e de potência;
- Elevado torque de partida, em baixas velocidades e em subidas, com elevadas potências nas altas velocidades do veículo;
- Extensa faixa de velocidade, operando com potência constante até por volta de 3 a 4 vezes a velocidade nominal;
- Alta eficiência por uma grande faixa de torque e velocidade, incluindo operação com torque baixo;
- Capacidade de sobrecarga intermitente, tipicamente o dobro do torque nominal, com curta duração;
- Alta robustez e confiabilidade, apropriadas ao ambiente do veículo;
- Custo aceitável.

Sendo assim, os tipos de motores mais largamente utilizados nos veículos elétricos são (DENTON, 2018) (DIAS, 2020):

- Motores de Corrente Contínua com escovas
- Motores de Indução
- Motores Síncronos de Ímãs Permanentes Sem Escovas
- Motores de Relutância

2.3.1 MOTORES DE INDUÇÃO

Os trólebus utilizados atualmente no sistema de transporte público da cidade de São Paulo, desenvolvidos pela empresa Eletra, são equipados com motores elétricos do tipo indução trifásica (ELETRA, 2025).

Os motores de corrente alternada trifásicos do tipo assíncrono, também conhecidos como motores de indução, constituem uma das tecnologias mais consolidadas e amplamente empregada em diversos setores, devido à sua construção simples, elevada robustez mecânica e baixo custo de aquisição e manutenção.

Nesses motores, não há alimentação elétrica direta ao rotor. A tensão necessária para a geração de corrente no rotor é induzida eletromagneticamente, a partir do campo girante gerado pelos enrolamentos trifásicos do estator. A conversão de energia elétrica em energia mecânica ocorre por meio da interação entre o campo magnético rotativo e as correntes induzidas no rotor.

Por se tratar de um motor assíncrono, a velocidade do rotor é ligeiramente inferior à velocidade do campo girante do estator, fenômeno conhecido como escorregamento. Essa característica é essencial para a geração de torque, mas impõe limitações ao controle preciso da velocidade em algumas aplicações.

2.3.2 MOTORES DE CORRENTE CONTÍNUA COM ESCOVAS

Os motores de corrente contínua com escovas destacam-se por apresentarem uma boa relação torque/velocidade e por exigirem um sistema eletrônico relativamente simples para o controle de velocidade.

O princípio de funcionamento baseia-se no torque gerado pelos enrolamentos de armadura localizados no rotor, enquanto o campo magnético fixo do estator é produzido por enrolamentos de excitação (circuito indutor). O rotor, constituído por um núcleo magnético com ranhuras longitudinais, abriga condutores conectados a um comutador mecânico, alimentado por meio de escovas. A interação entre os campos magnéticos do estator e do rotor gera a rotação do eixo.

Entretanto, limitações estruturais como peso e volume elevados, baixa eficiência e menor confiabilidade, decorrentes, em grande parte, da necessidade frequente de manutenção, especialmente pelo desgaste das escovas de carvão, têm contribuído para a substituição progressiva desses motores por alternativas mais modernas, favorecida também pela redução dos custos dos semicondutores e pela crescente adoção de motores de corrente alternada.

2.3.3 MOTORES SÍNCRONOS DE ÍMÃS PERMANENTES SEM ESCOVAS

Os motores síncronos de ímãs permanentes sem escovas têm se destacado em aplicações que demandam elevada eficiência energética, controle preciso e alta densidade de potência, como é o caso da tração elétrica veicular. A estrutura compacta desse motor permite a redução de peso e volume para uma mesma potência de saída, além de favorecer a dissipação térmica.

O funcionamento baseia-se na interação entre o campo magnético girante do estator, alimentado por corrente alternada trifásica, e o campo magnético fixo do rotor, gerado por ímãs permanentes, geralmente à base de neodímio. Tal configuração

dispensa o uso de enrolamentos no rotor e elimina perdas resistivas, resultando em melhor desempenho energético e menor necessidade de manutenção. Por operarem de forma síncrona, a velocidade do rotor é exatamente igual à do campo magnético do estator, sem escorregamento. O controle da comutação é realizado por meio de inversores eletrônicos, que ajustam dinamicamente as correntes trifásicas no estator conforme a posição do rotor.

Apesar das vantagens operacionais, esses motores apresentam custo de produção elevado, principalmente devido ao uso de materiais magnéticos de terras raras no rotor.

2.3.4 MOTORES DE RELUTÂNCIA

Os motores de relutância destacam-se por sua construção simples e robusta, dispensando o uso de ímãs permanentes e enrolamentos no rotor, o que contribui para menor custo, maior tolerância a falhas. Apresentam boa relação torque-velocidade e operam de maneira eficiente em uma ampla faixa de potência.

O torque é gerado pela variação da relutância no circuito magnético, sendo o rotor formado por chapas ferromagnéticas com geometria assimétrica, que se alinham com o campo magnético produzido sequencialmente pelos enrolamentos do estator. A comutação das fases é controlada eletronicamente, de forma sincronizada com a posição do rotor.

Todavia, esses motores apresentam limitações como ruído acústico elevado, interferência eletromagnética em dispositivos próximos e torque pulsante, que varia com a velocidade.

3. TRÓLEBUS

3.1. HISTÓRICO

O primeiro trólebus surgiu na Alemanha, em abril de 1882. Elaborado por Werner von Siemens, sua invenção, sob o nome de "*Elektromote*", consistia em uma carruagem de caça equipada com dois motores elétricos energizados por meio de cabos suspensos a uma linha aérea, conforme a figura 21. No entanto, o conceito original do veículo nunca avançou além dos estágios iniciais, devido ao estado precário das estradas da região.



Figura 21: "*Elektromote*", o primeiro trólebus construído no mundo.
Fonte: SIEMENS, 2025.

Posteriormente, por volta de 1900, Max Schiemann aprimorou o "*Elektromote*" e implantou a primeira linha de trólebus para transporte público na Alemanha. Em torno da década de 1920, o trólebus já havia se tornado bastante popular em toda a Europa. Gradualmente as linhas de ônibus e trólebus foram sendo substituídas por linhas de trem e metrô, cuja capacidade de transporte por passageiro é superior.

No Brasil, o sistema de trólebus foi inaugurado em 1949, na cidade de São Paulo. Nos anos seguintes, entre 1950 e 1960, outras cidades como Rio de Janeiro, em destaque na figura 22, Belo Horizonte, Porto Alegre e Fortaleza também investiram nesta tecnologia. Todavia, a maior parte desses sistemas foram desativados até 1972 devido ao alto custo de manutenção, dado que os veículos e as peças eram importados.



Figura 22: Trólebus em operação na cidade do Rio de Janeiro.
Fonte: BAZANI, 2019.

Atualmente existem 3 sistemas de trólebus operando no Brasil, todos no estado de São Paulo, dispostos de acordo com a tabela 3.

Tabela 3: Quantidade total de trólebus no Brasil.
Fonte: E-BUS RADAR, 2025.

Região	Quantidade de trólebus
Cidade de São Paulo	201
Região Metropolitana de São Paulo	120
Santos	6

A cidade de São Paulo se destaca por possuir a maior frota de trólebus da América do Sul. Apesar disso, este valor corresponde a pouco mais de 1% da frota total de ônibus da cidade.

3.2. CARACTERÍSTICAS E FUNCIONAMENTO DO TRÓLEBUS

O trólebus atual é um veículo rodoviário tracionado por motor elétrico, alimentado por meio de uma rede aérea instalada no trajeto a partir da qual recebe energia elétrica, e que se conecta ao veículo através de hastes presas no teto.

Por utilizar o motor elétrico em oposição ao motor a combustão, o veículo não emite GEE para a atmosfera, o que faz com que seja apontado como uma alternativa aos ônibus comuns. Além disso, os trólebus possuem vida útil superior a 20 anos, tornando-se um bom investimento a longo prazo. Ademais, possui baixo nível de ruído, até 50% inferior ao dos ônibus convencionais, trazendo mais conforto para a população em geral ao reduzir a poluição sonora. Por fim, traz mais conforto ao passageiro ao utilizar a aceleração controlada eletronicamente, que evita trancos

Sobre a infraestrutura, o trólebus opera tanto sobre pavimento de asfalto quanto de concreto, de forma idêntica ao ônibus a combustão.

O sistema de trólebus é alimentado por meio de subestações localizadas ao longo do percurso que variam de capacidade de acordo com a demanda necessária.

A rede elétrica é composta por dois fios paralelos de polaridades invertidas no qual as alavancas coletoras deslizam ao longo do percurso. A altura em relação ao solo pode variar de acordo com o entorno a pista, sendo limitado pelo comprimento das alavancas coletoras instaladas no veículo. Ao longo da rede elétrica são instalados uma série de componentes a fim de garantir o bom funcionamento do sistema que serão descritos a seguir:

- Separadores: são mecanismos cuja função é evitar com que os fios de polaridades opostas se encostem.
- Chaves de desvio: são mecanismos que possibilitam a mudança de direção das alavancas do veículo em caso de mudança de rota.

Ao longo do itinerário, a rede aérea é sustentada por braços metálicos que, por sua vez, são presos a postes. Tais braços metálicos podem ser do tipo rígido ou flexível, sendo os do tipo flexível mais recomendado para a aplicação, por garantir maior velocidade e menor incidência de escapes das alavancas.

3.3. PANORONAMA GLOBAL E TECNOLOGIAS ATUAIS

Ao longo dos anos, novas tecnologias foram aplicadas ao trólebus que resultaram em um sistema mais robusto, como por exemplo os itens a seguir:

- Marcha autônoma: a implantação de baterias nos trólebus permite que os veículos operem desconectados da rede aérea, tornando o modal mais versátil em casos de acidentes ou queda de energia. O uso de baterias também é recomendado em garagens e terminais, simplificando assim a estrutura da rede aérea.
- Freio regenerativo: devido a particularidade do trólebus possuir um motor elétrico, durante a desaceleração do veículo, o motor passa a funcionar como um gerador de energia, e a frenagem é feita pelo torque do motor. Tal tecnologia permite que aumente a autonomia do veículo e reduz os custos de manutenção com o sistema de frenagem.
- Alavancas pneumáticas: os pistões pneumáticos são equipados nas bases giratórias das alavancas coletoras com a função de abaixá-las em caso de escape da conexão e reconectá-las automaticamente em seguida, substituindo os recuperadores mecânicos de operação manual.

Essas inovações tecnológicas têm contribuído significativamente para a revitalização e expansão dos sistemas de trólebus em diversas partes do mundo. Com maior confiabilidade, eficiência operacional e flexibilidade, o modal tem se consolidado como uma alternativa sustentável frente aos desafios da mobilidade urbana moderna.

Atualmente, conforme demonstrado na tabela 4, os sistemas de trólebus estão presentes em mais de 40 países, abrangendo 257 cidades distribuídas pelos continentes da Europa, Ásia, América do Norte, América Latina e Oriente Médio. Em

termos de infraestrutura global, contabiliza-se uma rede total de aproximadamente 28.279 km de extensão, com cerca de 22.137 veículos em operação e 2.253 linhas ativas (UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS, 2025).

Tabela 4: Sistema trólebus pelo mundo
Fonte: UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS, 2025.

Região	Nº de cidades	Extensão (km)	Nº de veículos	Nº de linhas
Eurásia	128	17.335	11.823	1.488
Europa	85	5,700	5.390	517
Ásia-Pacífico	27	2.635	3.086	99
América Latina	13	1.820	1.029	95
América do Norte	5	785	797	53
Oriente Médio	1	4	12	1
Total	257	28.279	22.137	2.253

Entre os países com as maiores operações de sistemas de trólebus, destacam-se principalmente aqueles situados na região da Eurásia. A Rússia lidera o ranking global, com 5.549 veículos ativos distribuídos em 75 cidades, seguida pela Ucrânia, que mantém 35 redes operacionais e uma frota de 2.479 trólebus. Na Ásia, a China se destaca, com Pequim abrigando a maior frota municipal de trólebus do mundo, com 1.044 trólebus operando em 31 linhas, que somam aproximadamente 465 km de extensão. No panorama da União Europeia, sobressaem-se as redes de Vilnius (Lituânia), com 270 trólebus; Bucareste (Romênia), com 269; e Atenas (Grécia), com 267 veículos. Completando o panorama global, a Cidade do México destaca-se na América Latina, operando uma frota modernizada de 442 trólebus em uma rede de 261,6 km de extensão. Um marco tecnológico desse sistema é a Linha 10, conhecida como *trolebus elevado*, que consiste em uma via segregada, construída em estrutura elevada, destinada exclusivamente à operação de trólebus no modelo BRT (UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS, 2025).

4. MOBILIDADE URBANA

4.1 HISTÓRICO E CONTEXTO

O cenário atual do transporte público e seus desdobramentos decorrem intimamente do processo crescente de urbanização e industrialização experimentado em nível global desde a revolução industrial. De início tardio em relação a outros países mais desenvolvidos, o processo de urbanização no Brasil se intensificou a partir de 1950, por meio de políticas públicas que promoveram a industrialização, concentrada principalmente na região Sudeste do país, transformando-a no destino de migrantes em decorrência do êxodo rural. A partir de 1970, conforme demonstra a figura 24, mais da metade dos brasileiros já vivia em áreas urbanas, cuja oferta de emprego e de serviços públicos era maior.

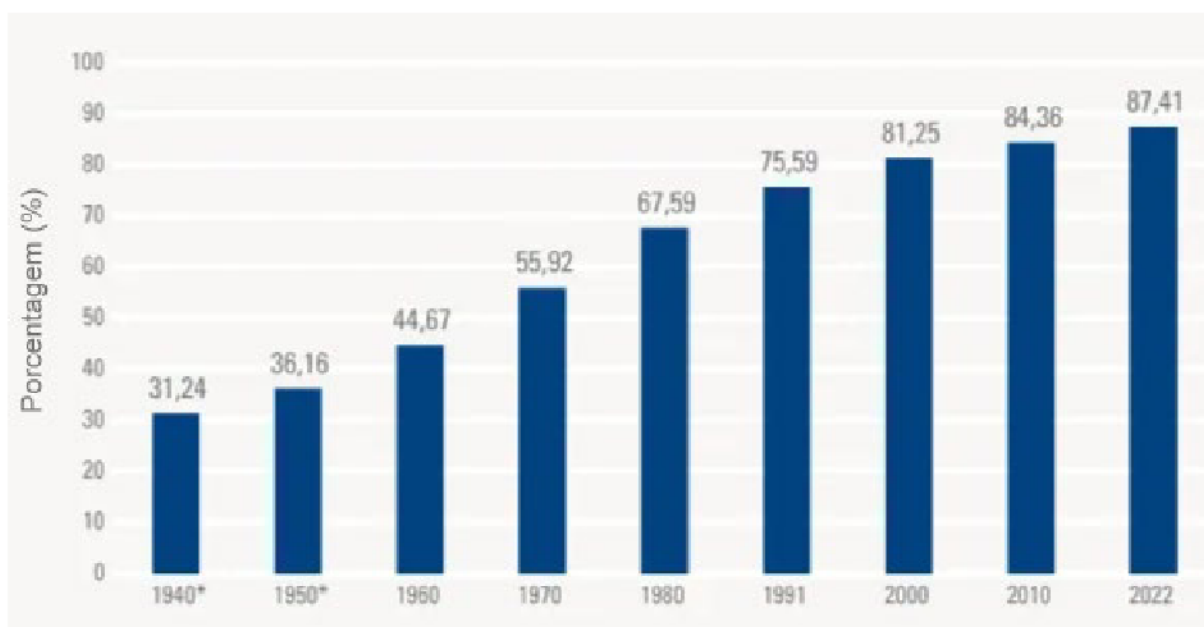


Figura 24: Taxa de urbanização brasileira.

Fonte: Adaptado de INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2022.

No decorrer dos anos, a intensa e acelerada migração da população do interior do país em direção às metrópoles resultou numa ocupação inadequada do espaço urbano. Esse processo desordenado desencadeou na saturação metropolitana e contribuiu com a ocorrência da periferização da população urbana, que consiste no surgimento de áreas habitacionais distantes dos grandes centros urbanos, sobretudo ocupadas pela população de baixa renda. Haja vista que esse dinamismo não foi acompanhado pelo desenvolvimento da infraestrutura urbana, as oportunidades de emprego e oferta de serviço público se mantiveram no centro das cidades, de modo que o transporte coletivo se tornou item essencial para o planejamento urbano (SENRA e BIENENSTEIN, 2023).

Dentro deste contexto, a logística de transporte brasileiro acompanhou tais mudanças e se desenvolveu com ênfase no modal rodoviário, priorizando-o em detrimento do transporte ferroviário, consolidando-se como o principal meio de transporte de cargas e passageiros no tráfego do país. Essa tendência também foi

seguida nas cidades, onde aproximadamente 54% das viagens são realizadas por veículos motorizados, considerando os deslocamentos por automóveis, motocicletas e ônibus. Além disso, cerca de 86% do total de transporte coletivo no país é realizado por ônibus, conforme mostra a figura 25.

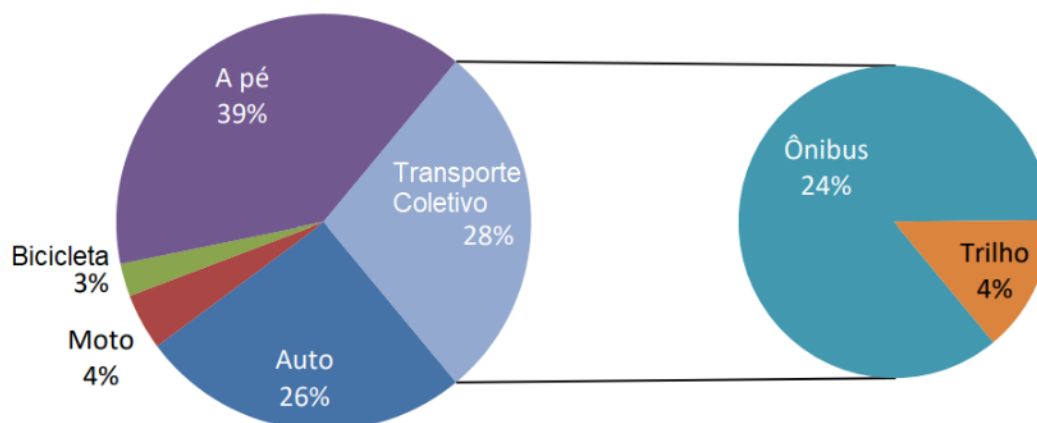


Figura 25: Distribuição percentual das viagens por modo de transporte.
Fonte: Adaptado de ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, 2020.

A hegemonia do transporte rodoviário, entretanto, não tem sido acompanhada por investimentos proporcionais em infraestrutura e qualidade dos serviços ofertados, o que compromete a eficiência do sistema e impacta negativamente a experiência dos usuários (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS, 2024). A figura 26 compara os tempos de viagem, em um trajeto de 10 quilômetros, entre algumas cidades brasileiras, em um dia útil típico, considerando tanto a média de duração dos deslocamentos em condições de congestionamento quanto os períodos de maior fluidez viária, definidos como tempo ideal de viagem.

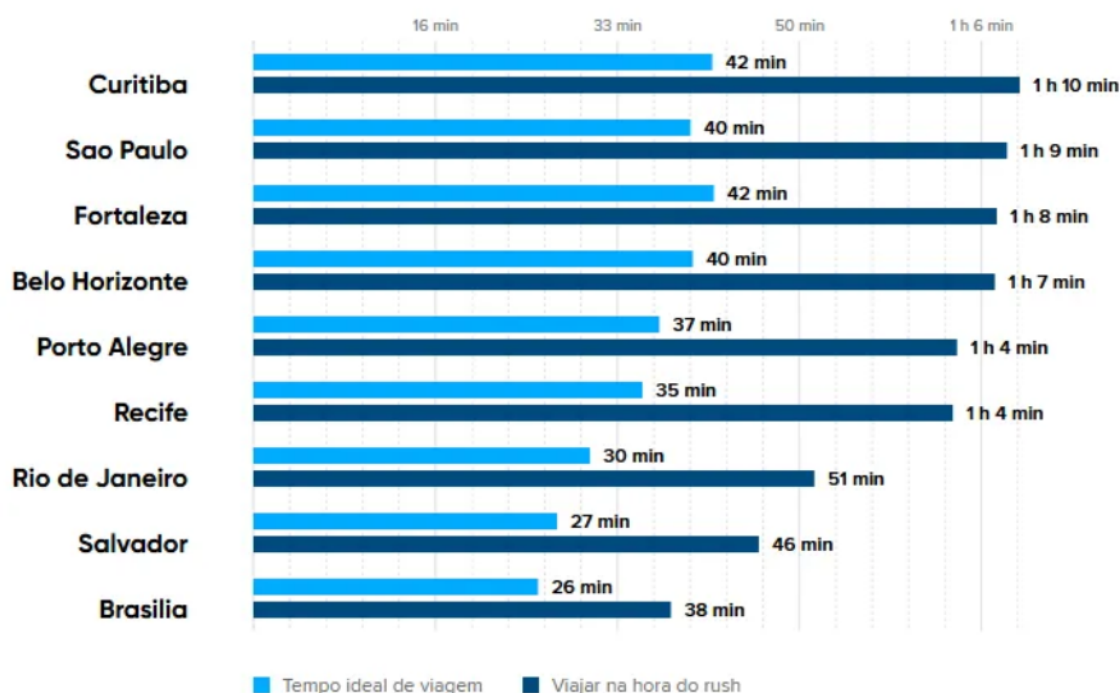


Figura 26: Tempo diário de viagem, em capitais brasileiras, em um percurso de 10 km (em minutos).
Fonte: TOMTOM, 2025.

Em todas as cidades analisadas, observa-se um descompasso entre o tempo ideal estimado para os deslocamentos e o tempo efetivamente gasto nos horários de pico. No Rio de Janeiro, por exemplo, o tempo necessário para a realização do percurso é, em média, 70% superior ao registrado em condições ideais de tráfego.

4.2 DIRETRIZES PARA A MOBILIDADE URBANA

A recorrência desses problemas nas grandes cidades brasileiras evidencia a necessidade de políticas públicas robustas e eficazes para enfrentar os desafios da mobilidade urbana. Em contextos de alta densidade populacional e demanda crescente por deslocamentos diários, cabe ao Estado a responsabilidade de garantir um sistema de transporte coletivo eficiente, integrado e acessível, assegurando o direito à mobilidade como parte do direito à cidade.

Esse direito é respaldado pela Constituição Federal de 1988, que, estabelece que compete ao poder público municipal promover o pleno desenvolvimento das funções sociais da cidade e garantir o bem-estar de seus habitantes (Art. 182) (BRASIL, 1988). Entre os instrumentos previstos para essa finalidade, destacam-se a criação do Plano Diretor e a promoção de políticas que ordenem o crescimento urbano de forma sustentável (RIO DE JANEIRO (CIDADE), 2024).

No campo específico da mobilidade, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), instituída pela Lei nº 12.587/2012, orienta os municípios a priorizarem o transporte público coletivo e os modos não motorizados sobre o transporte individual motorizado (BRASIL, 2012). A legislação também define os direitos dos usuários, os deveres dos entes federativos e os instrumentos que devem ser aplicados, como os

Planos de Mobilidade Urbana, visando à redução dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos e à melhoria da qualidade de vida nas cidades.

Complementando esse arcabouço legal, o Estatuto da Metrópole, estabelecido pela Lei nº 13.089/2015, reforça a necessidade de integração entre os municípios das regiões metropolitanas por meio de planos de desenvolvimento urbano integrado (BRASIL, 2015). Entre as funções públicas de interesse comum destacadas, está o transporte coletivo, que deve ser planejado e executado de forma articulada entre os entes federativos, com base em instrumentos de governança interfederativa.

Essas diretrizes legais têm como objetivo orientar o adensamento urbano de forma planejada, especialmente no que se refere à mobilidade, promovendo a valorização do transporte coletivo como estratégia para reduzir o congestionamento viário e os impactos negativos do uso excessivo do transporte individual. No entanto, como se tratam de políticas estruturais e de implementação gradual, seus efeitos ainda são limitados no curto prazo.

4.3 MOBILIDADE URBANA NO RIO DE JANEIRO

A cidade do Rio de Janeiro representa um caso emblemático para a compreensão das transformações na mobilidade urbana brasileira ao longo do último século. Com uma população estimada em 6.729.894 habitantes em 2024, distribuída em um território de aproximadamente 1.200 km², o município é o segundo mais populoso do país (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2023). Esta elevada densidade demográfica, somada à intensa circulação de pessoas oriundas da Região Metropolitana e ao constante fluxo de turistas, impõe desafios significativos à infraestrutura urbana e torna a mobilidade um dos principais desafios enfrentados pela gestão pública.

Até meados do século XX, o transporte coletivo sobre trilhos, especialmente os bondes elétricos, constituía o principal meio de locomoção urbana no Rio de Janeiro, estruturando a malha viária da cidade. Com o avanço da indústria automobilística nacional e a implementação de políticas voltadas à motorização individual, esse modelo foi gradualmente substituído. Conforme demonstra a figura 27, os bondes foram desativados, enquanto os automóveis e os ônibus passaram a dominar o espaço urbano, marcando a transição de uma mobilidade predominantemente elétrica para outra fortemente dependente de combustíveis fósseis.

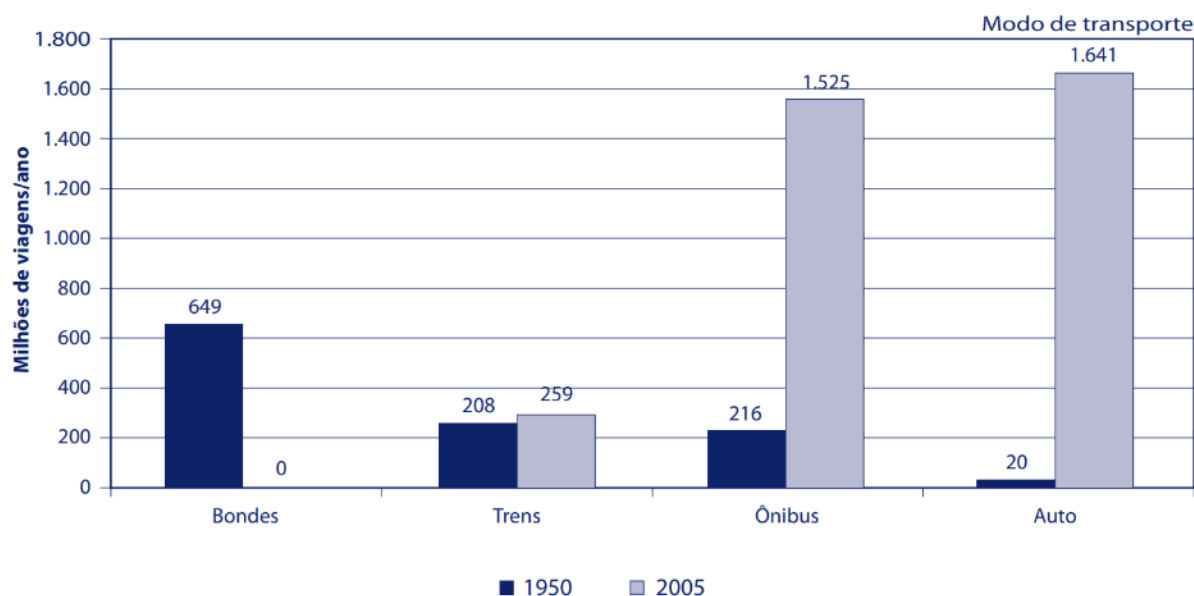


Figura 27: Mobilidade na cidade do Rio de Janeiro (1950 – 2005).

Fonte: VASCONCELLOS, CARVALHO e PEREIRA, 2011.

A reconfiguração do transporte urbano, que resultou na priorização do transporte individual e crescimento expressivo da frota, trouxe repercussão direta sobre o transporte coletivo, que vem enfrentando uma combinação de estagnação e acentuada redução na demanda. Conforme evidenciado na figura 28, o sistema de ônibus, historicamente o principal modal da cidade, apresentou uma queda expressiva no número de passageiros. Os sistemas de metrô e trem, após um período de relativa estabilidade, também registraram retração significativa.

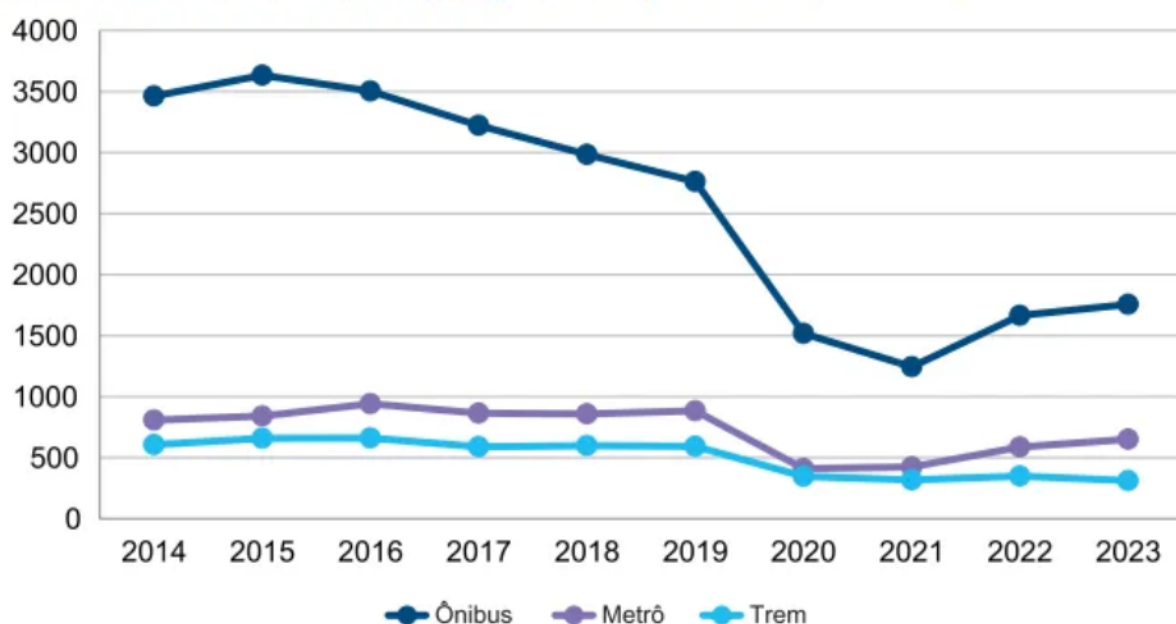


Figura 28: Movimento médio de passageiros no transporte coletivo (em milhares) no município.

Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE DO RIO DE JANEIRO, 2025.

Tal cenário resultou no crescimento contínuo da frota de veículos nas últimas décadas. Como mostra a figura 29, em 2023 os automóveis e caminhonetas representavam 74% da frota total do município, seguidos por motocicletas e motonetas (14%), enquanto ônibus e microônibus correspondiam a apenas 1%.

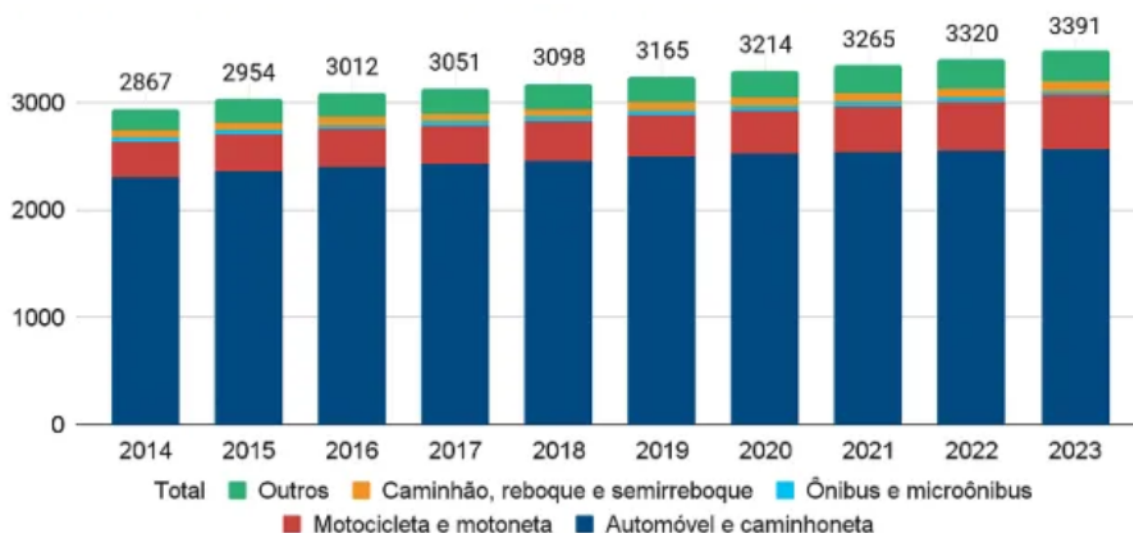


Figura 29: Evolução da frota no município em 10 anos (em milhares).
Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE DO RIO DE JANEIRO, 2025.

A insatisfação com a precariedade do transporte coletivo tem levado parte da população a migrar para o transporte individual, o que intensifica os congestionamentos, sobrecarrega a infraestrutura urbana e aprofunda as desigualdades no acesso à mobilidade. Para reverter essa tendência, é necessário adotar soluções integradas, sustentáveis e de alta capacidade, capazes de reorganizar o espaço urbano e recuperar a atratividade do transporte coletivo. Diante desse cenário, o município do Rio de Janeiro implementou o modelo *Bus Rapid Transit* (BRT) como estratégia para modernizar a infraestrutura do transporte público, aumentar a eficiência dos principais eixos viários e ampliar a capacidade de atendimento do sistema.

4.4 O MODELO BRT

O termo *Bus Rapid Transit* - BRT foi cunhado nos Estados Unidos na década de 1990. No entanto, este modelo foi implementado pela primeira vez na década de 1970, com a implantação dos primeiros 20 km de vias exclusivas para “Ônibus Expressos” na cidade de Curitiba. Seu sucesso tornou o sistema inspiração para vários outros projetos ao redor do mundo causando forte expansão do modelo a partir da década de 1990, de modo que o termo BRT sugere uma ruptura com a ideia convencional de transporte por ônibus e se aproxima da atuação de um sistema ferroviário.

Atualmente, os sistemas de BRT ao redor do mundo transportam cerca de 32 milhões de passageiros por dia, por meio de 440 corredores, operando em 191 cidades, totalizando uma extensão de 5.898 km (GLOBAL BRT DATA, 2025).

Ademais, 30 cidades contam com projetos para expandir o sistema atual, enquanto outras 49 cidades estão em fase de planejamento ou em construção de corredores de BRT. O Brasil possui 100 corredores BRT instalados em 27 cidades, com capacidade para transportar cerca de 8,8 milhões de passageiros por dia ao longo de 922 km de extensão total.

O *Bus Rapid Transit* - BRT é um termo geral usado para se referir a sistemas de transporte de ônibus urbanos de alta capacidade que operam na superfície viária em faixas exclusivas e infraestrutura particular, que objetiva em oferecer um serviço rápido, confiável e eficiente. Essencialmente, os sistemas BRT reúnem as características de melhor desempenho dos sistemas ferroviários modernos e os combinam com a flexibilidade dos sistemas veiculares para o transporte público rodoviário. O resultado é um sistema integrado projetado para melhorar a velocidade, confiabilidade e exclusividade dos sistemas de ônibus tradicionais, mas a um preço acessível à maioria das cidades. Para isto, o sistema BRT combina cinco características fundamentais que o definem: infraestrutura viária; estações e terminais dedicados; veículos articulados; sistema tarifário de pré-pagamento e sistema inteligente de transporte e integração.

1. Infraestrutura viária

Em geral, os corredores de BRT são implantados nas vias principais da cidade e tem como origem e destino grandes concentrações de demanda. Dado que tais vias possuem um tráfego intenso, o sistema BRT dispõe de uma faixa exclusiva inserida ao sistema viário, segregada fisicamente das demais através de guias, muros ou outros elementos estruturais, de modo que permita o movimento rápido dos veículos de BRT com o mínimo de interrupção do fluxo do restante da superfície da via. As faixas podem ser simples (uma em cada sentido) ou duplas, podendo ter faixas extras para ultrapassagem apenas nas estações. Além disso, o material de pavimentação e espessura devem ser escolhidos de tal modo que resistam ao peso do veículo, no seu processo de paragem e arranque, a fim de garantir maior durabilidade da via.

2. Estações e terminais dedicados

O ingresso dos passageiros ao BRT se dá pelas estações e terminais dedicados ao sistema, cujo acesso deve obedecer às normas de acessibilidade e embarque em nível, a fim de garantir a máxima adesão da população e reduzir o tempo de embarque e desembarque dos passageiros. Quanto a infraestrutura, deve-se assegurar o conforto dos usuários e evitar a superlotação. Além disto, as estações precisam estar espaçadas entre si de tal modo que o sistema atenda a população nas proximidades dos destinos com maior procura sem reduzir a velocidade comercial do sistema devido ao excesso de paradas, enquanto os terminais devem estar distribuídos ao longo do sistema de modo a suprir a alta demanda de passageiros.

3. Veículos articulados

Para um melhor aproveitamento do sistema, os ônibus utilizados no sistema BRT são do tipo articulado, que aumentam a capacidade de passageiros transportados por veículo em comparação com o sistema de ônibus tradicional.

4. Sistema tarifário de pré-pagamento

Ao instalar o sistema de cobrança de passagem antes do embarque no veículo, nas estações, evita-se uma série de circunstâncias que tornam a viagem mais lenta. Desse modo, os passageiros que se encontram na plataforma estão aptos a utilizar o sistema de forma mais rápida.

5. Sistema inteligente de transporte

Por fim, para que o sistema BRT proporcione aos usuários um alto nível de eficiência, segurança e conforto, é fundamental implementar aspectos de tecnologia da informação e comunicação, atualmente conhecidos como Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS). Os sistemas de transporte inteligentes fornecem informações sobre viagens e tráfego em tempo real, proporcionam equipamentos e técnicas para medir o congestionamento, aumentam a capacidade da rede e permitem oportunidades para melhor gerenciamento e aplicação dos custos de viagem. Desse modo, o sistema pode alterar a frota operacional de acordo com a demanda para otimizar o serviço.

4.5 O SISTEMA BRT NO RIO DE JANEIRO

A implantação do sistema BRT (Bus Rapid Transit) no município do Rio de Janeiro teve início em 2012, com a inauguração do corredor TransOeste. Atualmente, a rede é composta por cinco corredores principais (TransOeste, Lote 0, TransCarioca, TransOlímpica e TransBrasil) que atendem bairros das zonas Oeste, Norte e Central da cidade. Com uma extensão total de 157,5 km, o sistema conta com 142 estações e 13 terminais, consolidando-se como um dos principais eixos de mobilidade urbana da capital fluminense.

Com a implantação dos corredores expressos, diversas linhas de ônibus convencionais foram parcial ou totalmente extintas, especialmente aquelas que realizavam trajetos coincidentes com os eixos do BRT. Essas linhas foram reconfiguradas para operar como linhas alimentadoras, com o objetivo de transportar passageiros das regiões mais periféricas até as estações dos corredores principais. Essa estratégia visa ampliar a capilaridade da rede e integrar áreas menos acessíveis ao sistema de transporte de média capacidade, promovendo uma mobilidade mais eficiente e abrangente.

Em 2025, o BRT transportou, em média, cerca de 535 mil passageiros por dia (MOBI-RIO, 2025). Além de sua relevância como modal estruturante de média-alta capacidade, o BRT foi concebido com o propósito de operar de forma integrada aos demais sistemas de transporte público, tais como os ônibus convencionais, os trens urbanos, o metrô, o VLT e o Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão). A figura 30 apresenta uma visão geral da rede de transporte público do Rio de Janeiro, evidenciando a articulação espacial entre os corredores do BRT e as demais infraestruturas urbanas de mobilidade.

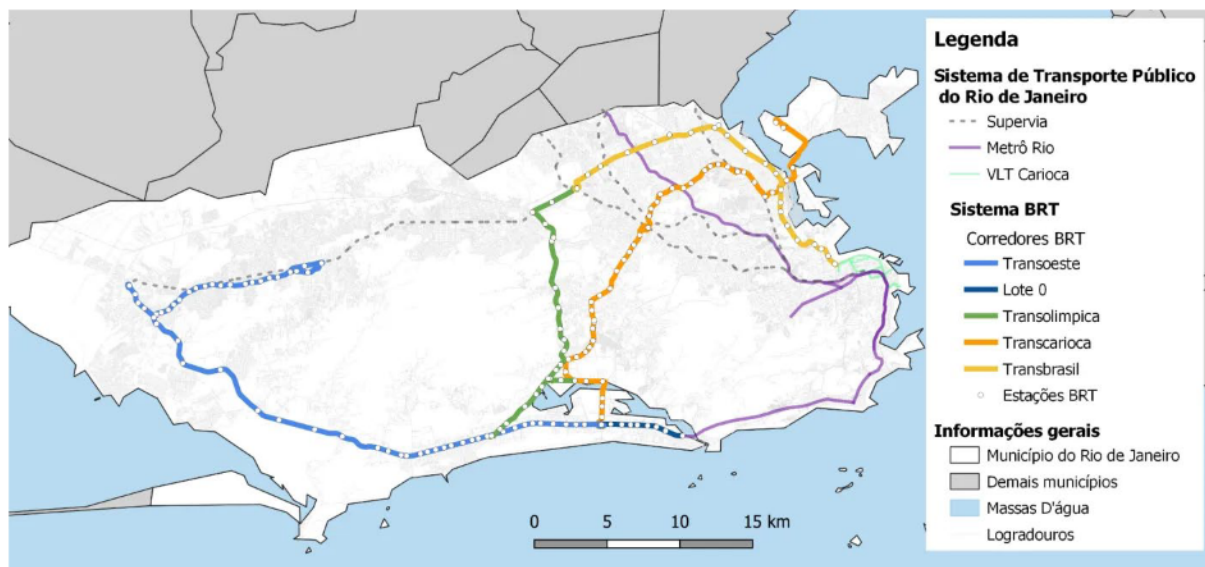


Figura 30: Visão Geral do sistema BRT e demais redes de transporte público de média a alta capacidade.

Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

A seguir, são apresentados os corredores que compõem o sistema BRT:

- **Transoeste:**

Inaugurado em 2012 como o primeiro eixo do sistema BRT na cidade do Rio de Janeiro, o corredor TransOeste teve seu trecho inicial ligando a Barra da Tijuca a Santa Cruz. Posteriormente, foi ampliado para atender também os bairros de Campo Grande e Paciência. Com 55,6 quilômetros de extensão, o corredor atravessa 10 bairros da Zona Oeste e inclui 54 estações e três terminais: Campo Grande, Santa Cruz e Alvorada.

- **Transcarioca:**

Inaugurado em 2014, em razão da Copa do Mundo no Brasil, o corredor TransCarioca estabelece ligação entre o terminal Alvorada, na Barra da Tijuca, e o Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão). Com 43,1 quilômetros de extensão, o corredor atravessa 27 bairros das zonas Norte e Oeste do Rio de Janeiro, abrangendo 45 estações e dois terminais: Paulo da Portela (Madureira) e Fundão. O sistema integra-se aos ramais ferroviários nas estações Madureira/Manacéia e Olaria, e à Linha 2 do metrô, na estação Vicente de Carvalho.

- **Lote 0:**

Em 2016, foi implementado o trecho denominado Lote Zero, que estende o trajeto do terminal Alvorada até o terminal Jardim Oceânico, onde há integração com a Linha 4 do metrô. Com quase 7 quilômetros de extensão, o corredor atravessa a região da Barra da Tijuca, incluindo 7 estações e um terminal: Jardim Oceânico.

- **Transolímpica:**

Inaugurado em 2016, no contexto dos Jogos Olímpicos do Rio, o corredor TransOlimpica conecta a Barra da Tijuca a Deodoro, integrando áreas estratégicas utilizadas durante o evento esportivo. Com 26 quilômetros de extensão, o corredor percorre 10 bairros e compreende 18 estações e três terminais: Jardim Sulacap, Centro Olímpico e Recreio.

- Transbrasil:

Inaugurado em 2024, o corredor TransBrasil tem como objetivo conectar a região de Deodoro ao Centro do Rio de Janeiro. Com 25,8 quilômetros de extensão, o trajeto atravessa 23 bairros e inclui 18 estações e quatro terminais: Deodoro, Margaridas, Missões e Gentileza. O corredor liga o terminal Deodoro, ponto de integração com a TransOlimpica, ao Terminal Intermodal Gentileza, onde haverá conexão com o Centro por meio do VLT.

A operação do sistema BRT do Rio de Janeiro foi organizada em três lotes operacionais, definidos com base na localização das garagens e na lógica de atendimento integrado aos diferentes corredores. Essa divisão visa otimizar a quilometragem produtiva, evitar sobreposições e assegurar maior eficiência na prestação dos serviços. Cada lote concentra, em média, entre 170 e 210 veículos e pode operar simultaneamente em mais de um corredor, uma vez que os serviços não são exclusivos por eixo. Essa estratégia operacional permite flexibilidade na alocação da frota e maior cobertura territorial, adaptando-se à demanda e à configuração da rede de estações.

A fim de sintetizar as principais características dos corredores que compõem o sistema BRT do Rio de Janeiro, a tabela 5 apresenta um panorama comparativo com os dados de cada eixo.

Tabela 5: Detalhamento dos corredores BRT.

Fonte: Adaptado de SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

Corredor	Inauguração	Extensão (km)	Nº estações	Nº terminais	Lote operacional
TransOeste	2012	55,648	54	3	Lote 3
TransCarioca	2014	43,118	45	2	Lote 1
Lote Zero	2016	6,928	7	1	Lote 1
TransOlimpica	2016	26,039	18	3	Lote 2
TransBrasil	2024	25,808	18	4	Lote 2

Para atender a diferentes padrões de demanda ao longo do dia e em distintas regiões da cidade, o sistema BRT do Rio de Janeiro opera com uma rede estruturada em quatro categorias de serviço: parador, expresso, direto e semidireto. Cada tipo possui funções específicas dentro da rede, com variações nos pontos de parada, nos

horários de operação e nos intervalos, permitindo maior flexibilidade e eficiência na alocação da frota conforme o volume de passageiros e a integração com outros modais.

- Parador: realiza paradas em todas as estações ao longo do trajeto.
- Expresso: atende apenas às estações de maior demanda, reduzindo o tempo de viagem.
- Direto e Semidireto: opera em um número restrito de terminais e estações estratégicas, próximas a pontos de integração com outros modais.

Com capacidade para atender aos altos volumes de passageiros nos corredores exclusivos, os veículos do sistema BRT estão em conformidade com as normas técnicas brasileiras aplicáveis ao transporte coletivo urbano. A frota, composta por ônibus Padron e articulados, é equipada com tecnologias como ar-condicionado, suspensão pneumática, piso alto e sistemas otimizados de transmissão e frenagem, assegurando elevado padrão de conforto, desempenho e segurança operacional. A tabela 6 detalha as dimensões e capacidades mínimas exigidas para os diferentes tipos de veículos utilizados no sistema BRT.

Tabela 6: Descritivo das dimensões e capacidades veiculares do sistema BRT.
Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

Tecnologia	Classe SISTEMA BRT	Dimensão Total (cota A)	Capacidade mínima (passageiros sentados e em pé, incluindo área reservada para acomodação de cadeira de rodas e cão guia, calculada conforme ABNT 15.570/2021)
Tração Diesel	Padron	Entre 12 e 14 metros, em sistema 4x2, ou 15 metros, em sistema 6x2.	85 passageiros
Tração Diesel	Articulado (Modalidade A)	Entre 18 e 19 metros, em sistema 6x2.	130 passageiros
Tração Diesel	Superarticulado (Modalidade C)	Entre 22 e 23 metros, em sistema 6x2 ou 8x2.	180 passageiros

Nos últimos anos, a frota do sistema BRT passou por um processo de renovação gradual, caracterizado pela substituição progressiva de veículos antigos por unidades mais modernas e tecnologicamente eficientes. A tabela 7 apresenta a composição da frota em 2023, totalizando 561 ônibus, distribuídos entre 71 veículos do tipo Padron, 20 articulados e 470 superarticulados, de acordo com as demandas operacionais da rede.

Tabela 7: Detalhamento da frota BRT.
Fonte: Adaptado de SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

Lote	Corredores	Padron P-7	Articulado P-7	Superarticulado P-7	Superarticulado P-8
Lote 1	TransCarioca e Lote Zero	0	20	160	0
Lote 2	TransBrasil e TansOlímpica	0	0	40	134
Lote 3	TransOeste	71	0	0	136

Todos os veículos operam com tração a diesel, utilizando uma mistura que contém 14% de biodiesel (B14), e estão em conformidade com os padrões ambientais do Proconve P-7 (equivalente ao Euro 5) e Proconve P-8 (equivalente ao Euro 6), os quais impõem limites mais rigorosos à emissão de poluentes, contribuindo para a mitigação dos impactos ambientais do transporte coletivo urbano.

O Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve) é o principal instrumento regulatório das emissões provenientes de fontes móveis no Brasil (IBAMA, 2022). Desde sua criação, o programa promoveu avanços significativos na indústria automotiva nacional e na qualidade dos combustíveis. No segmento de veículos pesados, como ônibus e caminhões, esses avanços resultaram em reduções substanciais nas emissões de poluentes atmosféricos.

O Proconve estrutura-se em fases (P1 a P8), correspondentes aos padrões europeus Euro I a Euro VI, com equivalência nos limites de emissão veicular estabelecidos, estabelecem limites progressivamente mais restritivos para substâncias nocivas à saúde e ao meio ambiente. A fase P-8, correspondente ao Euro 6, representa a etapa mais recente do programa, permitindo reduções de até 99% de monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC), 89% de óxidos de nitrogênio (NO_x) e 98% de material particulado (MP), em comparação à fase inicial P-1.

A figura 31 apresenta a evolução dos limites de emissão de NO_x e MP ao longo das diferentes fases do padrão europeu.

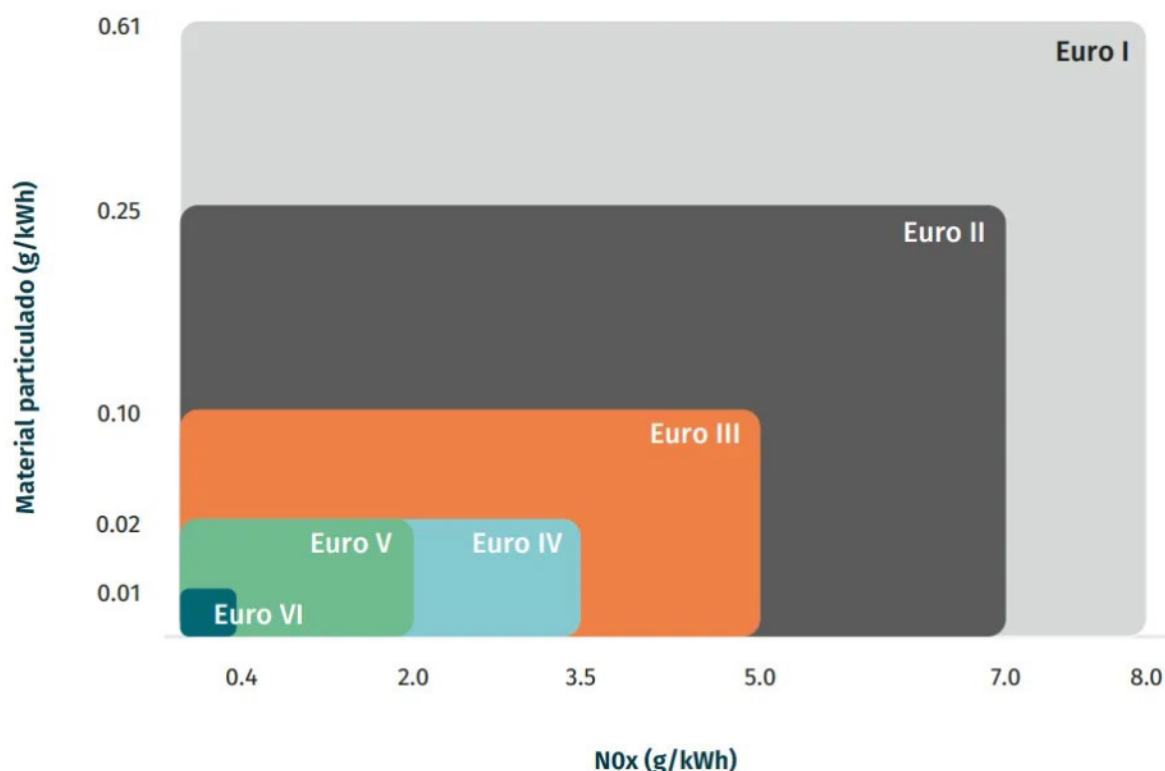


Figura 31: Evolução dos limites máximos de emissão de NOx e MP no padrão Euro.
Fonte: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS, 2024.

Nas últimas décadas, a modernização da frota de ônibus e a otimização dos veículos empregados no sistema BRT contribuíram significativamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa no transporte coletivo urbano. Apesar desses avanços, outras rotas tecnológicas ainda apresentam potencial relevante para a mitigação de impactos ambientais, especialmente no que se refere à eliminação de poluentes atmosféricos em áreas urbanas densas. Nesse contexto, a adoção de trólebus, veículos elétricos alimentados por rede aérea, surge como uma alternativa promissora para a substituição progressiva dos ônibus convencionais a diesel, promovendo ganhos adicionais em termos de sustentabilidade e eficiência energética.

5. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho tem como principal objetivo quantificar e comparar as emissões atmosféricas associadas ao transporte público por ônibus nas linhas de BRT do Rio de Janeiro, considerando dois cenários distintos: o sistema atualmente em operação, com veículos movidos a óleo diesel, e uma proposta de transição tecnológica baseada na adoção de trólebus, alimentados por energia elétrica por meio de rede aérea.

A estimativa das emissões constitui uma etapa essencial para avaliar os impactos ambientais do transporte rodoviário urbano, tanto em termos de contribuição às mudanças climáticas quanto aos efeitos sobre qualidade do ar local, especialmente em contextos de alta densidade populacional e intensa circulação veicular.

Para isso, adotou-se uma metodologia quantitativa baseada em simulação, fundamentada na ferramenta ReFrota, desenvolvida pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA) (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021). Essa plataforma oferece uma estrutura de cálculo consolidada, adaptada à realidade brasileira e amplamente utilizada em estudos técnicos voltados à avaliação de frotas urbanas. A utilização da ferramenta permite estimar o volume de gases de efeito estufa (como CO₂) e de poluentes locais (como óxidos de nitrogênio e material particulado), com base nas características operacionais e tecnológicas da frota analisada.

A ferramenta ReFrota realiza seus cálculos com base em diversos parâmetros, entre os quais se destacam o porte dos veículos, a tecnologia de motorização empregada, a quilometragem percorrida e o consumo energético, considerando tanto combustíveis fósseis quanto energia elétrica. A estimativa das emissões é feita com base em fatores de emissão padronizados, provenientes de bases de dados reconhecidas, como a CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) (INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021).

A escolha desse tipo de abordagem se justifica pela sua capacidade de trabalhar com dados reais da operação veicular e de projetar, com base em parâmetros técnicos padronizados, os impactos ambientais associados à substituição tecnológica da frota.

5.1. FONTE DOS DADOS

Os dados utilizados para caracterizar a frota do sistema BRT do Rio de Janeiro foram obtidos por meio do site da Prefeitura do Rio de Janeiro, junto à Secretaria Municipal de Transportes (SMTR), responsável pelo planejamento e fiscalização do transporte público no município, permitindo a caracterização detalhada da frota em operação nos corredores do sistema BRT da cidade.

Para o cenário alternativo com trólebus, os dados foram obtidos por meio de solicitações via Lei de Acesso à Informação (LAI) à Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU) e à SPTrans, responsáveis pela gestão do sistema de trólebus na Região Metropolitana de São Paulo e na capital, respectivamente.

5.2. CONSIDERAÇÕES METODOLÓGICAS

Para a realização deste estudo, foram adotadas decisões metodológicas com base na disponibilidade dos dados e na adequação da abordagem ao objetivo proposto.

A análise considerou como referência a frota operante do sistema BRT para os cálculos de emissões. Essa escolha justifica-se porque a frota determinada, embora represente o total de veículos disponíveis no sistema, engloba uma reserva técnica de 10% que é adicionada à frota operante exclusivamente para cobrir eventuais indisponibilidades, como manutenções ou falhas. Como esses veículos de reserva não operam de forma contínua, sua inclusão poderia levar à superestimação das emissões efetivas do sistema em funcionamento.

A figura 32 apresenta a distribuição proporcional dos diferentes tipos de veículos na frota operante, considerando o porte e o padrão de emissão. Verifica-se a predominância dos veículos superarticulados com tecnologia P-8, que correspondem a 48% da frota total (244 veículos), seguidos pelos superarticulados P-7, com 36% (180 veículos), pelos veículos padron P-7, com 13% (64 veículos), e pelos articulados P-7, que representam apenas 3% (18 veículos) da frota. A frota total considerada é de 506 veículos. Tal distribuição revela a predominância de veículos superarticulados de 23 metros na operação, fator que exerce influência direta sobre os níveis de emissão e o consumo energético do sistema.

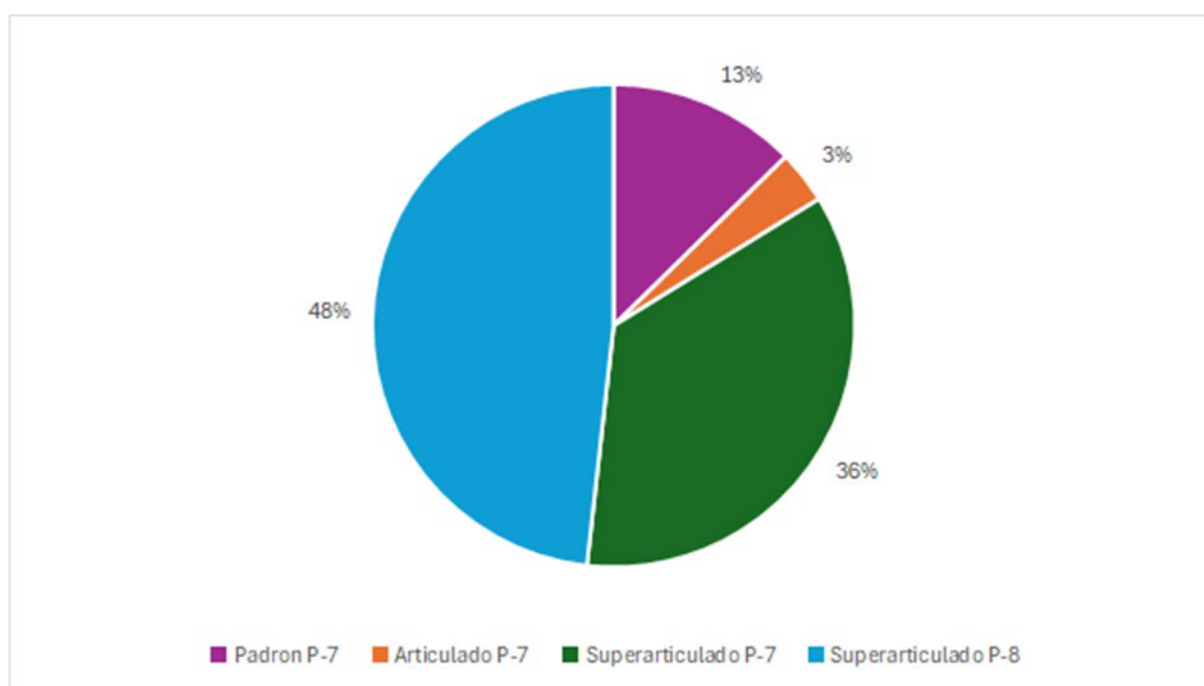


Figura 32: Distribuição da frota operante por tipo de veículo e padrão de emissão.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SMTR (2023).

A figura 33 apresenta a distribuição da frota do sistema BRT do Rio de Janeiro, segmentada por tipo de veículo e padrão de emissão, de acordo com o lote operacional, destacando a frota operante e a reserva técnica.

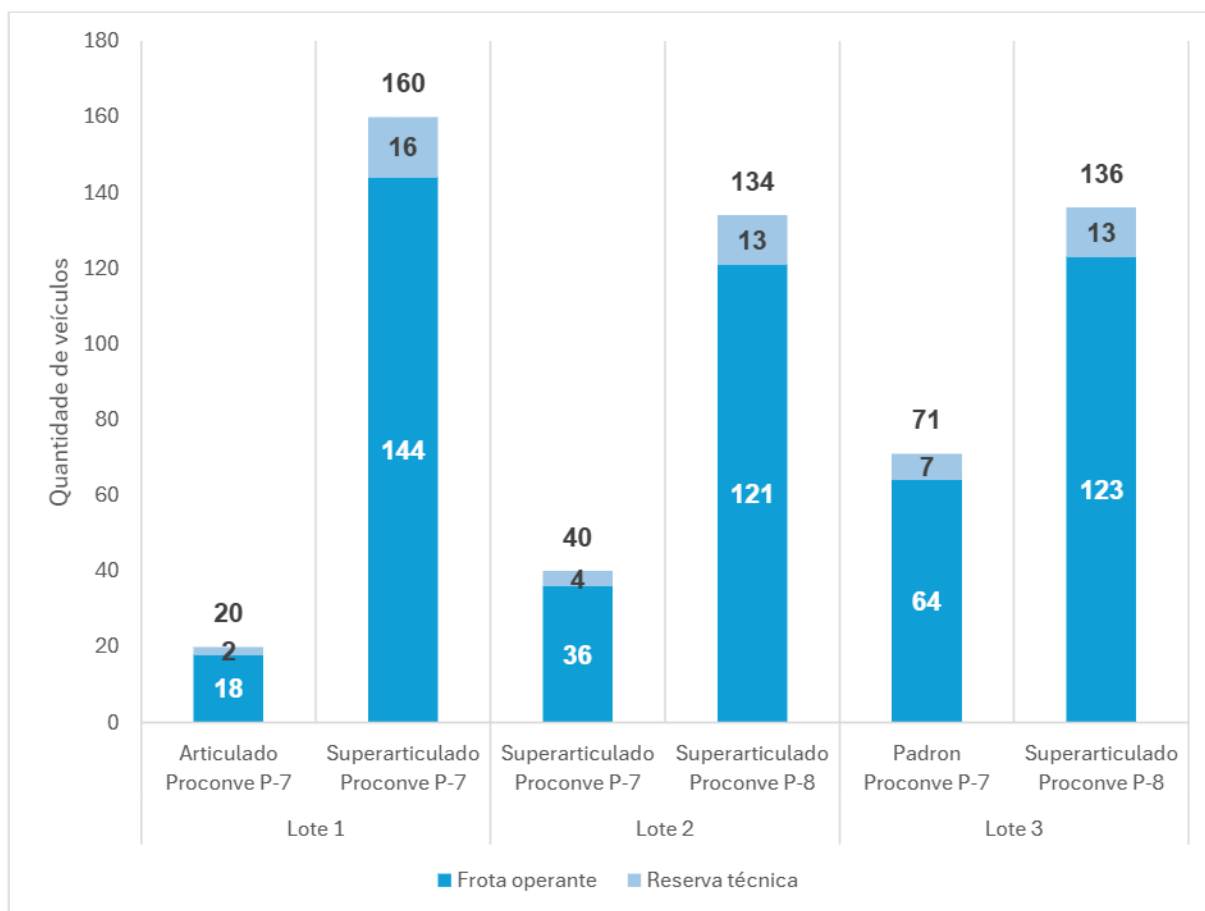


Figura 33: Composição da frota do BRT por tipo de veículo, padrão de emissão e lote.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SMTR (2023).

A Figura 34 apresenta uma síntese por lote operacional, com a soma dos veículos alocados em cada lote, diferenciando a frota operante da reserva técnica. Observa-se que o Lote 3 concentra o maior número de veículos em operação, com 187 unidades, seguido pelos Lotes 1 e 2, com 162 e 157 veículos, respectivamente, totalizando 506 veículos.

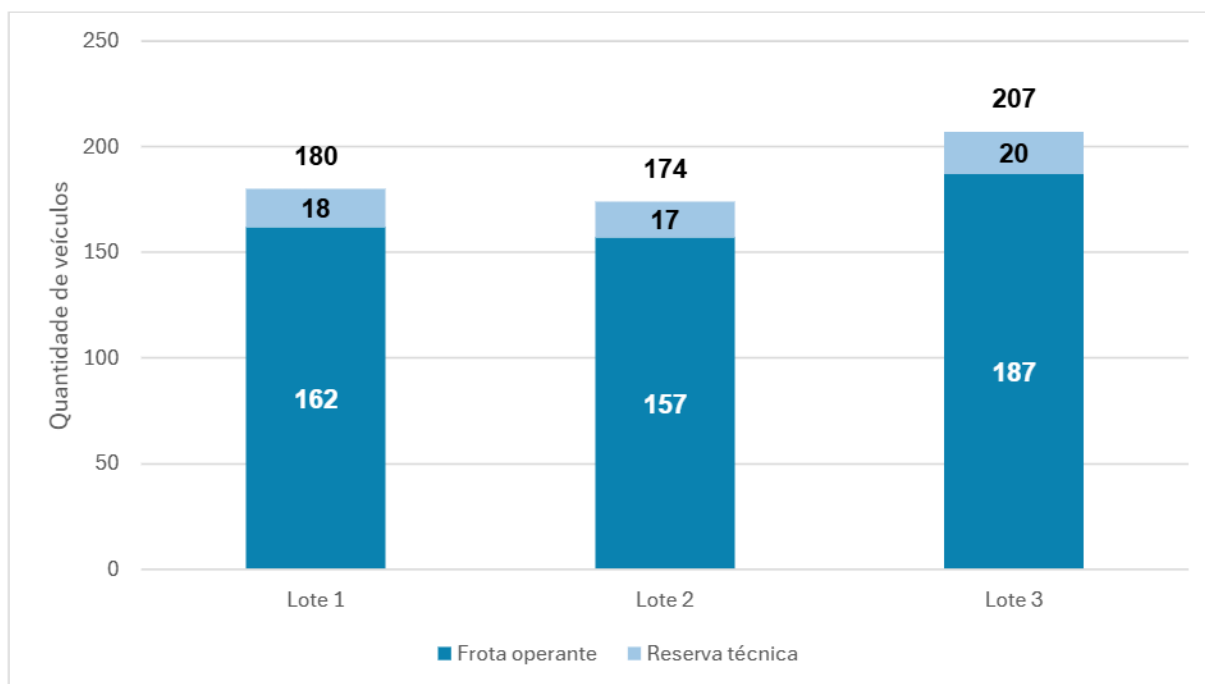


Figura 34: Composição da frota do BRT por lote.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SMTR (2023).

Outro aspecto considerado na análise refere-se à quilometragem mensal percorrida por veículo, estimada a partir da soma do Percurso Médio Mensal (PMM) Comercial e do PMM Improdutivo, ambos expressos em quilômetros por veículo por mês. O PMM Comercial refere-se aos deslocamentos realizados com passageiros a bordo, enquanto o PMM Improdutivo corresponde aos trechos percorridos sem passageiros, como nos trajetos entre garagens e terminais ou nos deslocamentos entre viagens. Tal abordagem permite contabilizar todas as emissões relacionadas à operação dos veículos, independentemente da presença de usuários.

A figura 35 apresenta a quilometragem mensal média percorrida por veículo, discriminada entre PMM Comercial e PMM Improdutivo, conforme os diferentes tipos de veículos e lotes operacionais analisados.

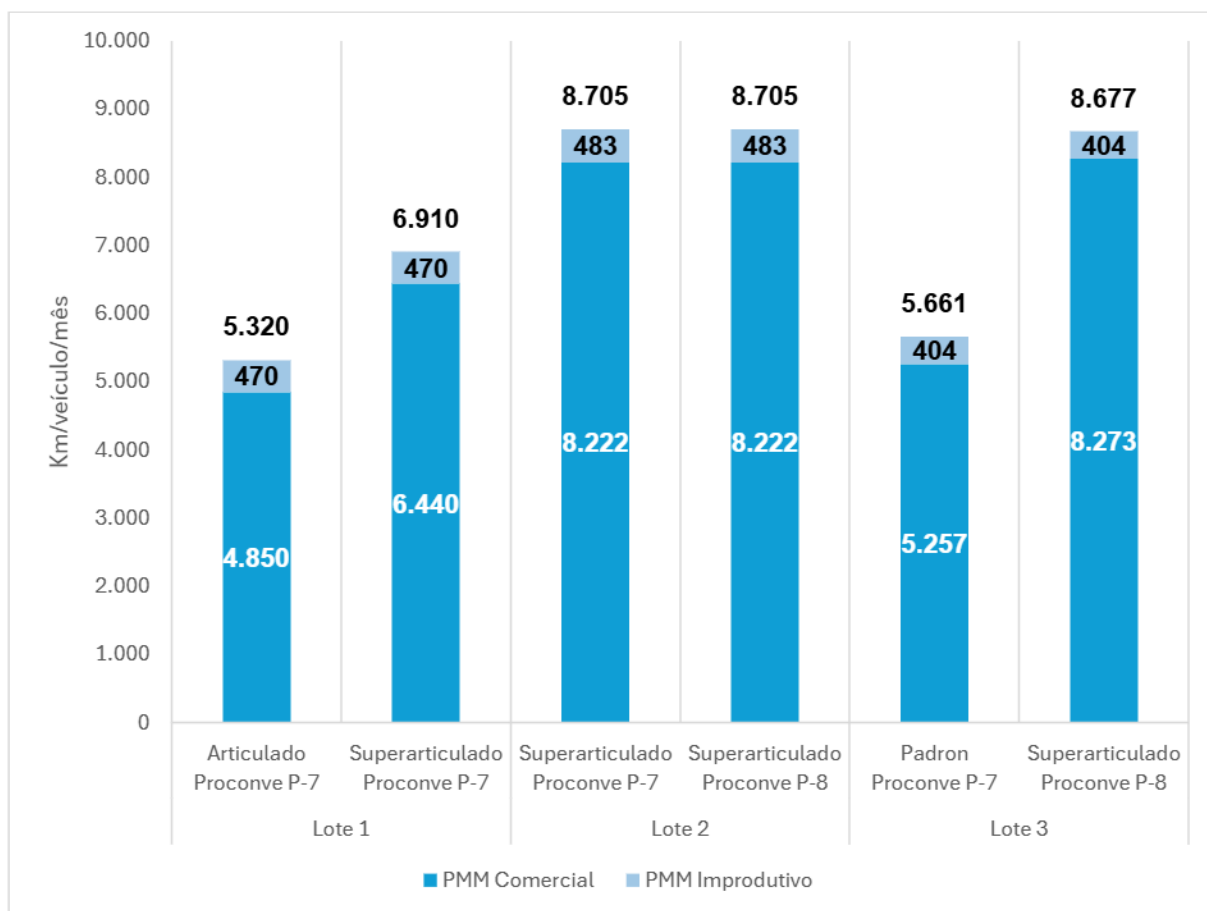


Figura 35: Quilometragem mensal média por veículo.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SMTR (2023).

A figura 36 apresenta uma síntese por lote operacional, resultante da soma das quilometragens mensais médias percorridas por todos os tipos de veículos alocados em cada lote. Verifica-se que o Lote 2 registra o maior valor de PMM total, com 17.410 km/veículo/mês, seguido pelo Lote 3, com 14.338 km/veículo/mês, e pelo Lote 1, com 12.230 km/veículo/mês.

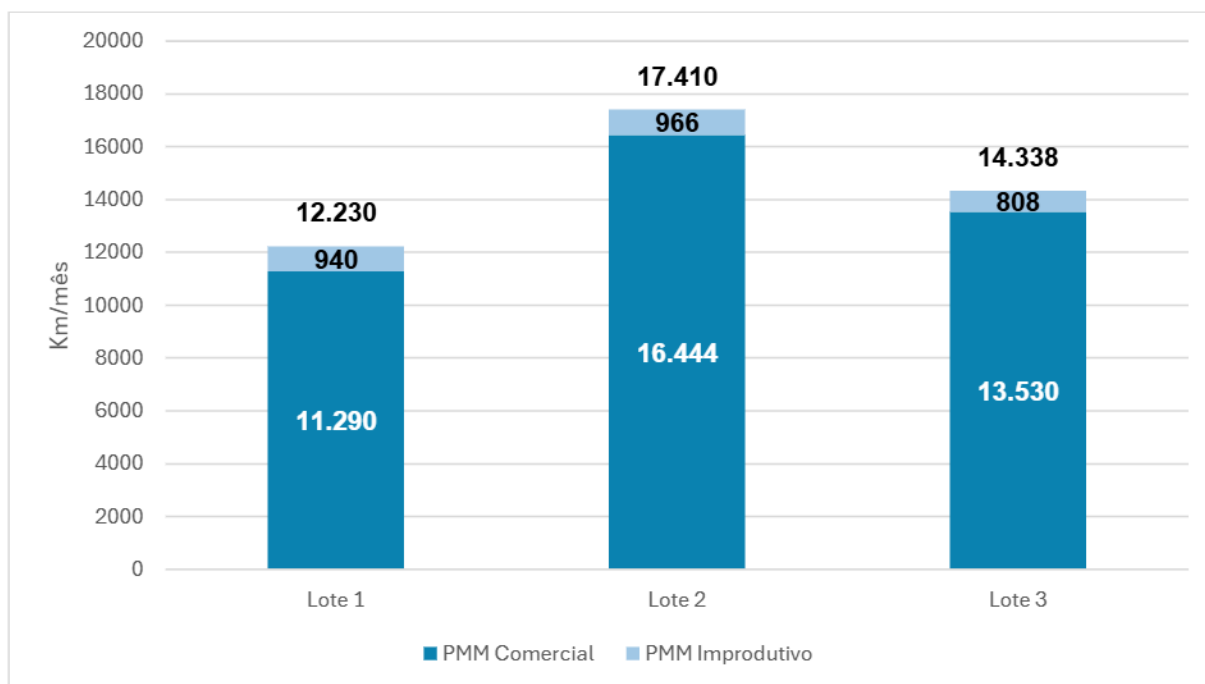


Figura 36: Quilometragem mensal média por lote.
Fonte: Elaborado pelo autor com dados da SMTR (2023).

5.3. LIMITAÇÕES DOS DADOS

A ferramenta ReFrota considera apenas as emissões diretas geradas pelos veículos em circulação (*tank-to-wheel*), desconsiderando as emissões indiretas associadas à cadeia produtiva dos combustíveis, da geração elétrica ou da fabricação dos veículos. Essa limitação é particularmente relevante na análise do cenário alternativo com trólebus, que, embora não apresentem emissões no veículo, têm seu impacto ambiental total condicionado à matriz energética responsável pelo fornecimento de eletricidade.

O cenário analisado para o sistema BRT do Rio de Janeiro tem como base dados referentes ao ano de 2023, por serem as informações públicas mais atualizadas oficialmente disponibilizadas até o momento da realização da pesquisa. Ainda que representem o cenário mais recente da operação do sistema BRT, os dados utilizados não contemplam variações sazonais ou operacionais que ocorrem ao longo do dia, da semana ou em diferentes períodos do ano. Portanto, os resultados aqui apresentados refletem uma condição de máxima exigência operacional, e reconhece-se que as emissões reais, ao longo do tempo, podem ser inferiores às estimadas, em função da oscilação da demanda e da não utilização contínua de toda a frota operante.

No cenário alternativo com trólebus, há uma diferença entre as dimensões dos veículos utilizados no sistema de São Paulo e aqueles empregados no BRT do Rio de Janeiro. Diante da ausência de trólebus com dimensões equivalentes, adotou-se, para fins de cálculo, o modelo de 21,5 metros de comprimento, atualmente o maior trólebus em operação no sistema de transporte público de São Paulo. Esse modelo foi utilizado como substituto dos veículos articulados de 20 metros e superarticulados de 23 metros que compõem a frota do BRT do Rio de Janeiro. É importante destacar que os veículos articulados de 20 metros representam apenas cerca de 3% da frota do sistema carioca, sendo os superarticulados amplamente predominantes. Ainda assim,

considerando que ambos os modelos apresentam consumo energético médio semelhante, a utilização do trólebus de 21,5 metros como referência não compromete a validade dos resultados estimados quanto ao consumo energético.

Por fim, vale ressaltar que a frota de trólebus em São Paulo é composta quase integralmente por veículos com mais de 10 anos de uso, o que pode implicar diferenças de desempenho em relação a modelos mais modernos.

5.4. PARÂMETROS DE EMISSÃO DA FERRAMENTA REFROTA

Para a estimativa das emissões atmosféricas associadas à frota a diesel, a ferramenta ReFrota utiliza fatores de emissão padronizados por tipo de veículo e tecnologia, expressos por quilômetro rodado.

A tabela 8 apresenta os valores adotados para os principais poluentes avaliados neste estudo: dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x).

Tabela 8: Fatores de emissão da ferramenta ReFrota por tipo de veículo e tecnologia
Fonte: INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE, 2021.

Tipo	Tecnologia	Emissões de CO ₂ (kg/km)	Emissões de MP (g/km)	Emissões de NO _x (g/km)
Padron	Proconve P-7	1,286	0,026	3,093
Articulado	Proconve P-7	1,700	0,034	4,087
Superarticulado	Proconve P-7	1,700	0,034	4,087
Superarticulado	Proconve P-8	1,700	0,016	0,691

5.5. PARÂMETROS DA FROTA

A seguir, são apresentados os principais parâmetros técnicos e operacionais utilizados na estimativa das emissões atmosféricas associadas aos dois cenários analisados neste estudo. O cenário da frota de BRT movida a diesel foi adotado como referência para os cálculos do cenário alternativo, que considera a substituição dos veículos por trólebus com características operacionais equivalentes, de modo a assegurar a consistência na análise entre as duas tecnologias. Os parâmetros são organizados de acordo com sua aplicabilidade.

5.5.1. PARÂMETROS COMUNS AOS DOIS CENÁRIOS

Tabela 9: Parâmetros comuns aos dois cenários
Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

Quantidade total de veículos em operação por porte	Padron	Articulado	Superarticulado
	64	18	424
Presença de sistema de ar-condicionado	100% na frota		
Quilometragem média mensal por lote	Lote 1	Lote 2	Lote 3
	12.230	17.410	14.338

5.5.2. PARÂMETROS ESPECÍFICOS DO CENÁRIO BRT MOVIDO A DIESEL

Tabela 10: Parâmetros específicos do cenário BRT movido a diesel
Fonte: SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR), 2023.

Tecnologia veicular	Proconve P-7 e Proconve P-8		
Mistura de biodiesel utilizada	14% (B14)		
Consumo médio de combustível por tipo de veículo	Padron	Articulado	Superarticulado
	0,56 L/km	0,74 L/km	0,74 L/km
Custo do combustível	R\$ 6,042/L		

5.5.3. PARÂMETROS ESPECÍFICOS DO CENÁRIO COM TRÔLEBUS

Tabela 11: Parâmetros específicos do cenário com trólebus
Fonte: EMTU, 2025 e SPTrans, 2025

Consumo médio de energia elétrica por tipo de veículo	Padron	Articulado	Superarticulado
	3,92 kWh/km	5,39 kWh/km	5,39 kWh/km
Tarifa de energia elétrica	R\$ 0,681/kWh		

Conforme apresentado nas tabelas 9, 10 e 11, esses parâmetros serviram de base para a inserção das informações na ferramenta ReFrota, possibilitando a

simulação comparativa entre os dois modelos tecnológicos. A tabela 12 apresenta uma síntese dos principais dados operacionais e técnicos utilizados nos cálculos de emissões.

Tabela 12: Síntese dos parâmetros operacionais do sistema BRT inseridos na ferramenta ReFrota.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Lote	Tipo	Tecnologia	Frota operante	Quilometragem mensal média por veículo	Consumo de diesel mensal, em litros, por veículo
Lote 1	Articulado	Euro V (P-7)	18	5.320	3.936,8
Lote 1	Superarticulado	Euro V (P-7)	144	6.910	5.113,4
Lote 2	Superarticulado	Euro V (P-7)	36	8.705	6.441,7
Lote 2	Superarticulado	Euro VI (P-8)	121	8.705	6.441,7
Lote 3	Padron	Euro V (P-7)	64	5.661	3.170,16
Lote 3	Superarticulado	Euro VI (P-8)	123	8.677	6.420,98

6. ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação da ferramenta ReFrota, considerando dois cenários para o sistema de transporte coletivo por ônibus na cidade do Rio de Janeiro. O primeiro reflete a operação atual com ônibus a diesel, enquanto o segundo simula a substituição completa da frota por trólebus de porte equivalente. A análise compara os impactos ambientais, com ênfase nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) e poluentes locais, bem como no consumo energético e nos respectivos custos operacionais.

Os resultados referem-se a um período mensal, com base na quilometragem média percorrida por veículo, conforme a estrutura de cálculo da ferramenta ReFrota.

Visando contextualizar as análises desenvolvidas neste estudo, a figura 37 apresenta a distribuição da quilometragem mensal média percorrida por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro. O Lote 3 registra a maior média mensal, totalizando 1.429.575 km, seguido pelo Lote 2, com 1.366.685 km, e pelo Lote 1, com 1.090.800 km.

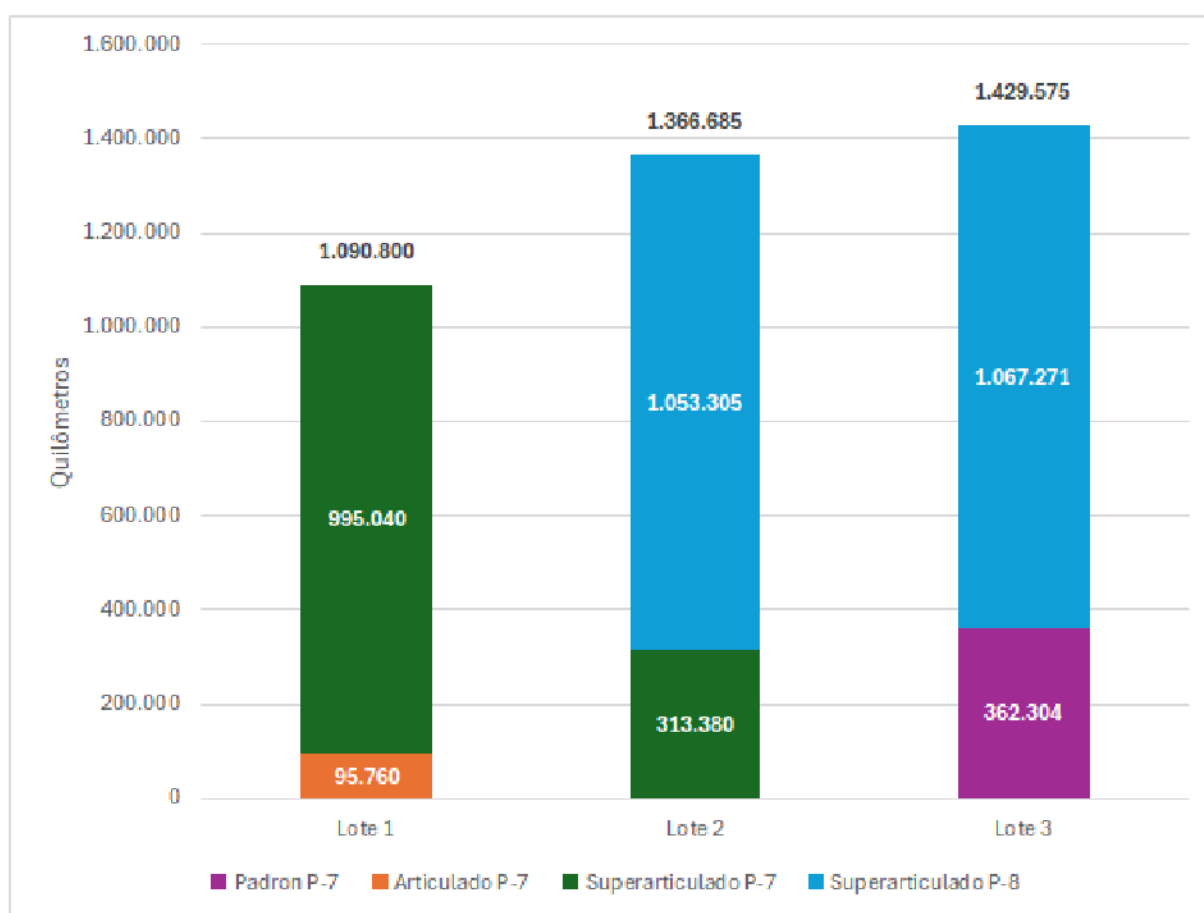


Figura 37: Quilometragem mensal média por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tal distribuição evidencia as diferenças significativas na capacidade operacional entre os lotes, refletindo a composição da frota, a extensão dos trajetos e a intensidade

da demanda de cada corredor. Nos Lotes 2 e 3, o uso mais elevado do sistema justifica a predominância de veículos de maior porte, como os superarticulados, que são mais adequados para operar em trechos com maior volume de passageiros.

6.1. ANÁLISE AMBIENTAL

A análise ambiental tem como objetivo mensurar os impactos gerados pela operação do sistema BRT da cidade do Rio de Janeiro. Essa avaliação é fundamental para compreender o grau de contribuição da frota atual à degradação da qualidade do ar e ao agravamento das mudanças climáticas, além de estimar os benefícios potenciais de uma transição energética no transporte coletivo urbano.

As estimativas mensais abrangem as emissões de dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), com base nos parâmetros operacionais da frota em atividade. Os poluentes analisados foram selecionados por seu impacto direto na saúde pública e no meio ambiente urbano. As estimativas consideram apenas as emissões no ponto de operação dos veículos, conforme a abordagem *tank-to-wheel* adotada pela ferramenta ReFrota.

6.1.1. CENÁRIO ATUAL: BRT MOVIDO A DIESEL

São apresentados, a seguir, os resultados do cenário atual de operação do BRT no Rio de Janeiro, destacando as emissões atmosféricas geradas pela frota movida a diesel, com base nos parâmetros operacionais observados no ano de 2023. A análise por lote operacional permite identificar os segmentos da frota com maior impacto ambiental e fornece a base para comparação com o cenário de trólebus.

6.1.1.1. EMISSÕES DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

A figura 38 apresenta as emissões mensais totais de dióxido de carbono (CO₂) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro. Observa-se que o Lote 2 registra maior volume de emissões, totalizando aproximadamente 2,32 milhões de kg de CO₂ por mês, seguido pelo Lote 3, com cerca de 2,28 milhões de kg de CO₂ por mês, e pelo Lote 1, com aproximadamente 1,85 milhão de kg de CO₂ por mês.

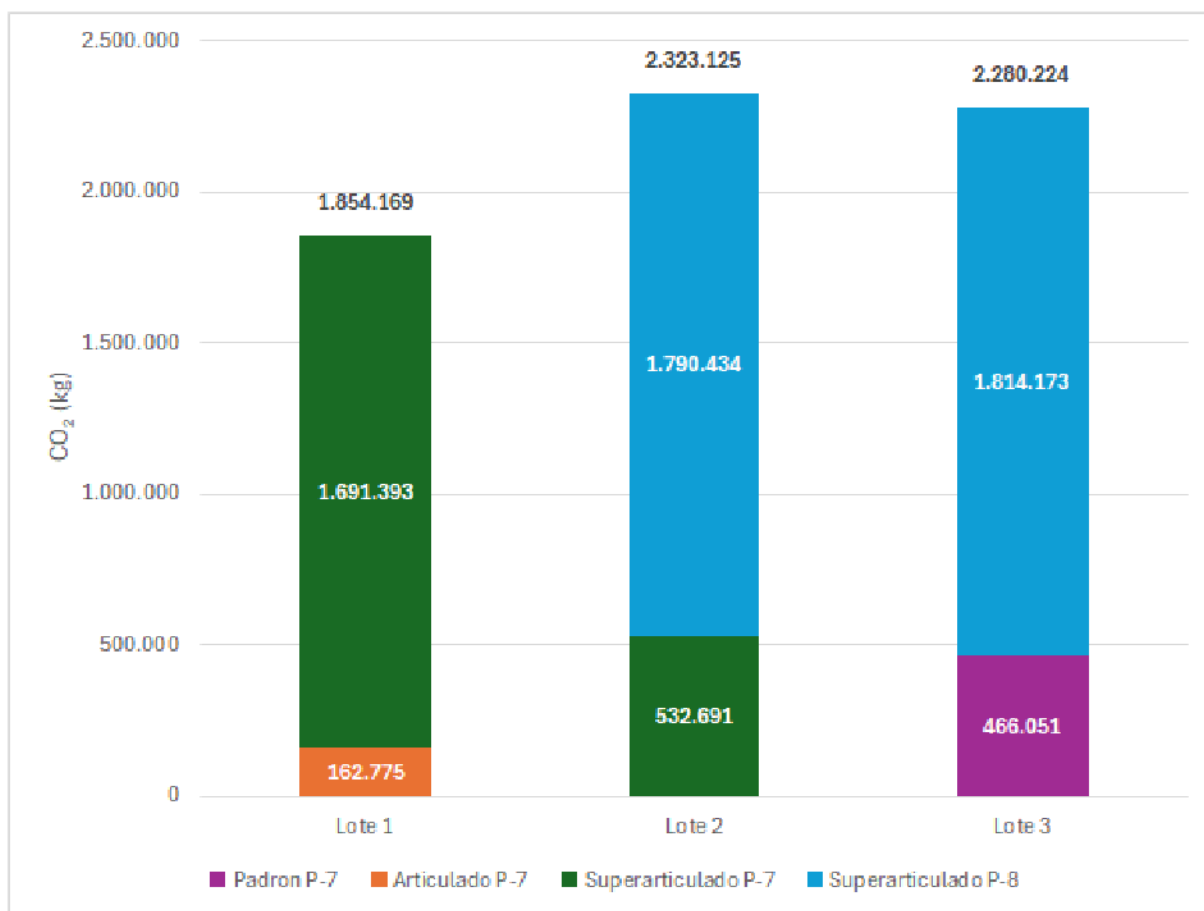


Figura 38: Emissões mensais de dióxido de carbono (CO₂) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise revela que os veículos superarticulados, que correspondem a aproximadamente 84% da frota operante, compartilham o mesmo fator de emissão de CO₂ (1,700 kg/km), independentemente do padrão tecnológico. Assim, observam-se que as emissões totais são influenciadas pela combinação entre o tamanho da frota operante e a intensidade da atividade operacional.

6.1.1.2. EMISSÕES DE MATERIAL PARTICULADO (MP)

A figura 39 apresenta as emissões mensais de material particulado (MP) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro. O Lote 1 concentra o maior volume de emissões, totalizando aproximadamente 37,153 kg de MP por mês, seguido pelo Lote 2, com 27,758 kg de MP por mês, e pelo Lote 3, com 26,649 kg de MP por mês.

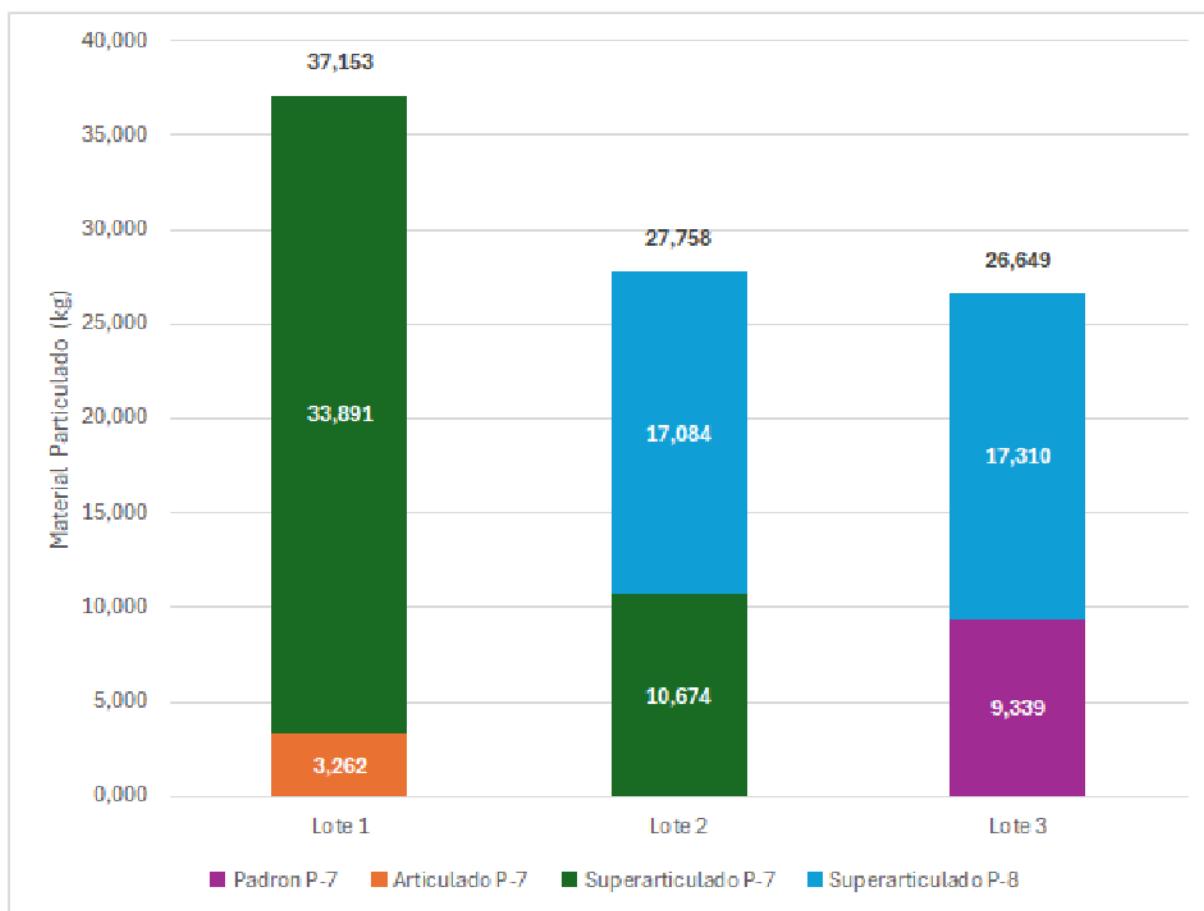


Figura 39: Emissões mensais de material particulado (MP) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser visto na tabela 8, diferentemente do dióxido de carbono (CO_2), as emissões de MP estão diretamente relacionadas à composição tecnológica da frota. Os veículos articulados e superarticulados com tecnologia Proconve P-7, que representam 39% da frota operante, possuem o maior fator de emissão de MP entre os tipos analisados (0,034 g/km). O Lote 1, composto integralmente por esse tipo de veículo, apresenta, por conseguinte, o maior nível de emissões mensais.

Em contraste, os Lotes 2 e 3 apresentam participação significativa de veículos superarticulados com tecnologia Proconve P-8, cujo fator de emissão de MP é consideravelmente inferior (0,016 g/km). Essa diferença tecnológica contribui para a redução das emissões totais, mesmo em cenários de alta quilometragem mensal, comuns à operação em ambos os lotes.

6.1.1.3. EMISSÕES DE ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO_x)

A figura 40 apresenta as emissões mensais totais de óxidos de nitrogênio (NO_x) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro. O Lote 1 concentra o maior volume absoluto de emissões, totalizando aproximadamente 4.458 kg de NO_x por mês, valor mais que o dobro das emissões observadas no Lote 2, com 2.009 kg de NO_x por mês, e no Lote 3, com 1.858 kg de NO_x por mês.

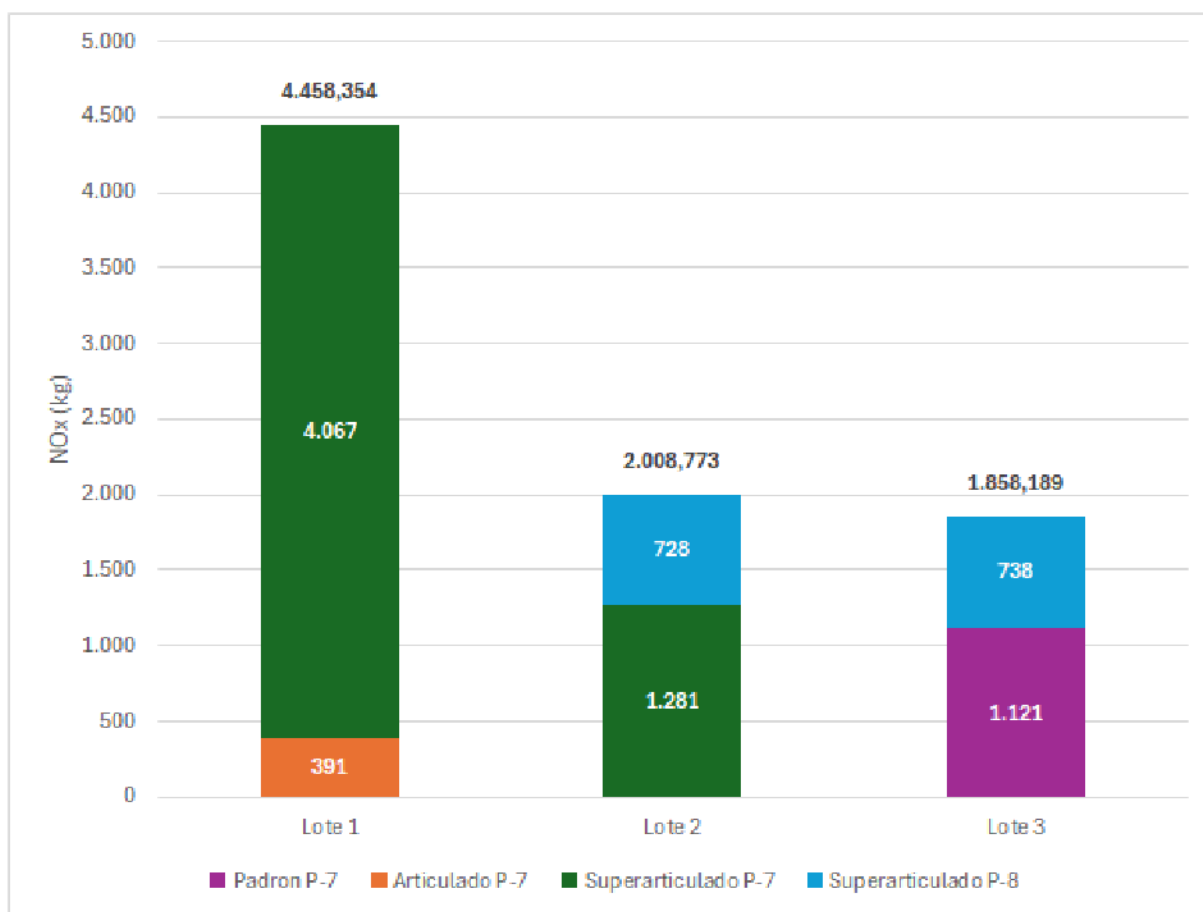


Figura 40: Emissões mensais de óxidos de nitrogênio (NO_x) por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim como observado nas emissões de material particulado (MP), os resultados de NO_x estão relacionados à tecnologia veicular empregada. O Lote 1, formado exclusivamente por veículos articulados e superarticulados com padrão Proconve P-7, apresenta os fatores de emissão de NO_x mais elevados (4,087 g/km), o que justifica seu maior volume de emissões.

Nos Lotes 2 e 3, verifica-se a predominância de veículos superarticulados com padrão Proconve P-8, cujo fator de emissão é significativamente inferior (0,691 g/km), representando uma redução superior a 80% em relação aos veículos P-7, o que contribui para os menores níveis de emissões observados nesses lotes. Cabe destacar que, embora em menor quantidade, os veículos Padron no Lote 3 contribuem de forma relevante nas emissões de NO_x devido ao seu elevado fator de emissão (3,093 g/km).

6.1.2. CENÁRIO ALTERNATIVO: TRÓLEBUS

O cenário alternativo simula a substituição total da frota do BRT do Rio de Janeiro por trólebus de porte equivalente. A estimativa das emissões foi feita com base nas mesmas características operacionais do cenário atual, permitindo uma comparação

direta. Como se trata de um modal elétrico, as emissões diretas de CO₂ e poluentes locais são nulas no ponto de operação, uma vez que a ferramenta ReFrota considera apenas as emissões durante a operação veicular (*tank-to-wheel*), sem incluir a geração de eletricidade.

6.2. ANÁLISE DO CONSUMO ENERGÉTICO

O consumo energético constitui um indicador para avaliação da eficiência operacional e ambiental de sistemas de transporte público. No contexto da transição energética e da busca por modais mais sustentáveis, a comparação entre o gasto energético do sistema BRT movido a diesel e o cenário alternativo com trólebus elétricos permite compreender os benefícios potenciais da eletrificação da frota urbana.

6.2.1. CENÁRIO ATUAL: BRT MOVIDO A DIESEL

A figura 41 apresenta o consumo mensal total de óleo diesel por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro. Os valores foram estimados com base na quilometragem mensal percorrida por cada tipo de veículo e nos respectivos coeficientes de consumo.

O Lote 2 registra o maior volume de consumo, com aproximadamente 1.011.347 litros por mês, seguido pelo Lote 3, com 992.671 litros por mês, e pelo Lote 1, com 807.192 litros por mês.

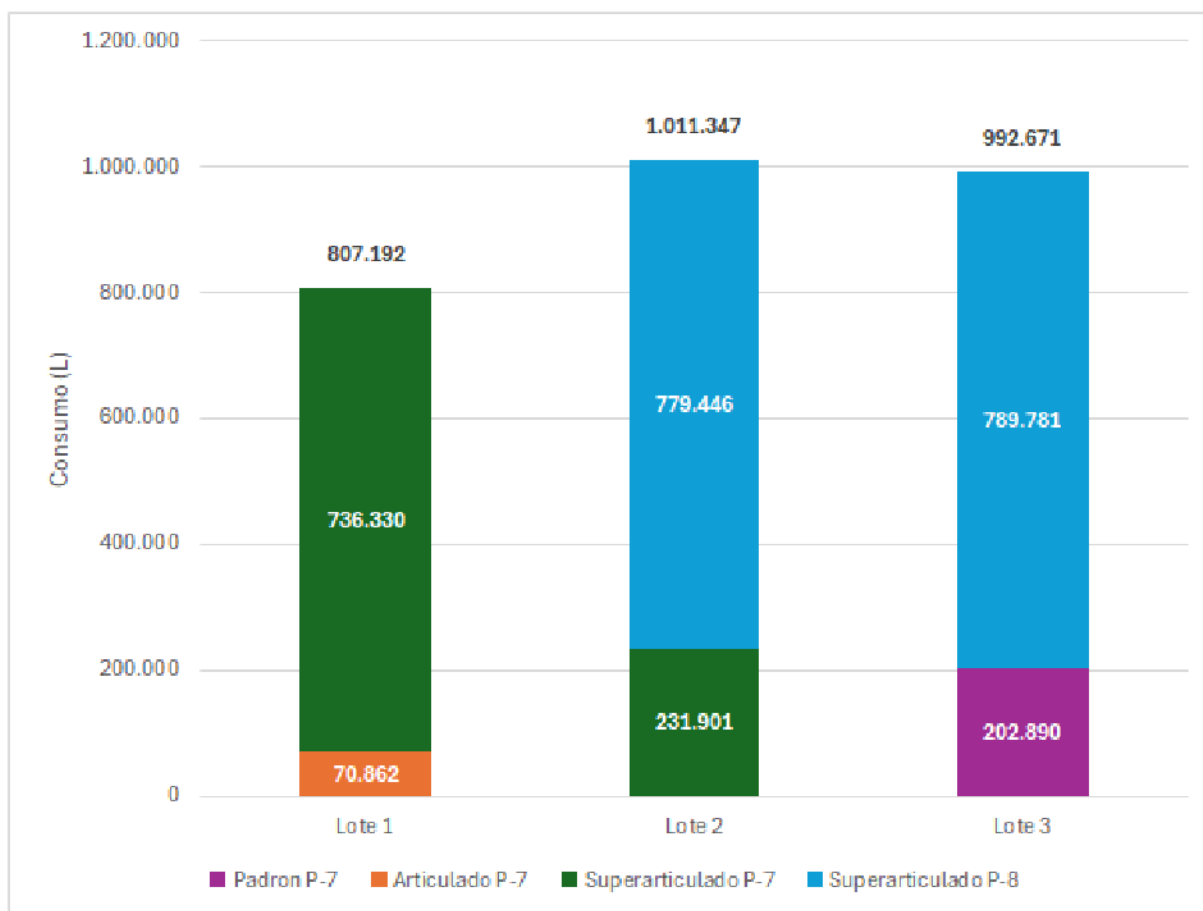


Figura 41: Consumo mensal total de óleo diesel por lote operacional no sistema BRT do Rio de Janeiro.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O consumo energético do BRT a diesel está mais associado à intensidade operacional de cada lote do que ao tipo ou à tecnologia dos veículos, considerando que articulados e superarticulados consomem, em média, 0,74 L/km, independentemente de pertencerem às categorias Proconve P-7 ou P-8. Dessa forma, os elevados volumes de consumo nos Lotes 2 e 3 decorrem, sobretudo, da maior quilometragem percorrida mensalmente e do número mais elevado de veículos em operação.

6.2.2. CENÁRIO ALTERNATIVO: TRÓLEBUS

A figura 42 apresenta o consumo mensal estimado de energia elétrica para o cenário alternativo, no qual a frota do sistema BRT é substituída por trólebus de porte equivalente. Os valores, expressos em kWh, foram calculados seguindo a mesma metodologia aplicada ao cenário a diesel.

O Lote 2 apresenta o maior consumo total, com aproximadamente 7.366.432 kWh por mês, seguido pelo Lote 3 (7.172.822 kWh por mês) e pelo Lote 1 (5.879.412 kWh por mês).

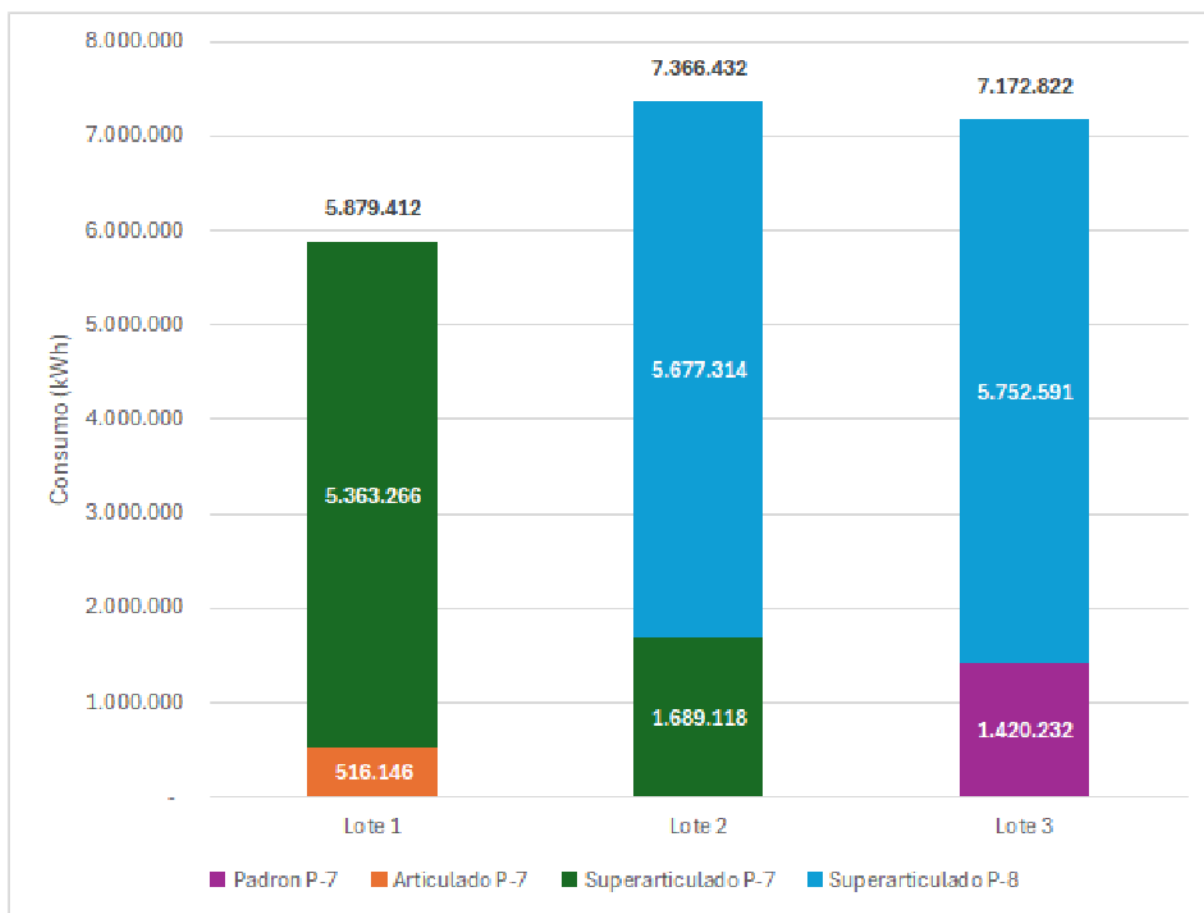


Figura 42: Consumo mensal estimado de energia elétrica por lote operacional no cenário alternativo com trólebus.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A distribuição entre os lotes é bastante semelhante à verificada no cenário com ônibus a diesel, o que reforça que o volume de consumo energético está diretamente relacionado à intensidade operacional de cada lote, independentemente da fonte de energia utilizada.

7. DISCUSSÃO

Este capítulo tem como objetivo interpretar os resultados obtidos ao longo do estudo e compreender as implicações ambientais, energéticas e econômicas da substituição do sistema BRT movido a diesel por trólebus na cidade do Rio de Janeiro, com base nos cálculos realizados a partir da ferramenta ReFrota.

7.1. ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

A tabela 13 apresenta o comparativo entre as emissões mensais totais estimadas para os dois cenários analisados.

Tabela 13: Comparativo das emissões mensais estimadas de CO₂, MP e NO_x de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Sistema	Emissões de CO ₂ (kg)	Emissões de MP (kg)	Emissões de NO _x (kg)
BRT	6.457.517	91,559	8.325,315
Trólebus	0	0	0

Os resultados obtidos indicam ganhos ambientais expressivos, tanto em termos de emissões de gases de efeito estufa quanto de poluentes atmosféricos locais. No cenário alternativo analisado, as emissões diretas de dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x) no ponto de operação seriam nulas, uma vez que os trólebus utilizam motores elétricos alimentados por rede aérea, dispensando a queima de combustíveis fósseis durante seu funcionamento. Nesse contexto, estima-se uma redução potencial mensal de aproximadamente 6.458 toneladas de CO₂, 92 kg de MP e 8,3 toneladas de NO_x, o que representa a eliminação completa das emissões diretas desses poluentes durante o uso dos veículos.

A mitigação das emissões de CO₂ se destaca como um importante avanço em direção à neutralidade de carbono no setor de transportes urbanos, em consonância com as metas climáticas assumidas pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris e com a legislação nacional, como a Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012), que incentivam a transição para sistemas de transporte mais limpos e sustentáveis (BRASIL, 2012). No total, a estimativa de emissões evitadas neste estudo é de cerca de 77,5 mil toneladas de CO₂ por ano, o que representa aproximadamente 5% do total de emissões anuais do estado do Rio de Janeiro em 2023, conforme demonstrado no gráfico 12.

No que diz respeito aos poluentes atmosféricos locais, as reduções observadas contribuem significativamente para a melhoria das condições ambientais e de saúde pública. O material particulado fino (MP), associado ao agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares e ao aumento da mortalidade precoce, especialmente entre crianças e idosos, teria sua emissão anual reduzida em cerca de 1,1 tonelada. Já os óxidos de nitrogênio (NO_x), precursores do ozônio troposférico e responsáveis

pela formação de chuvas ácidas e pela deterioração da qualidade do ar urbano, teriam suas emissões diminuídas em aproximadamente 100 toneladas por ano. A eliminação desses poluentes representa uma melhoria direta na qualidade do ar da cidade, com potencial para reduzir internações hospitalares e os custos públicos com saúde.

É importante ressaltar que os valores de redução de emissões apresentados ao longo deste estudo foram estimados com base na frota em operação no ano de 2023, conforme dados fornecidos pela Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro. Desde então, o sistema BRT passou por uma ampliação, e atualmente conta com um número de ônibus superior ao considerado na modelagem deste estudo. Portanto, a substituição da frota atual por trólebus poderia resultar em reduções ainda mais significativas nas emissões de CO₂, material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), ampliando o impacto ambiental positivo da proposta.

Além disso, o presente estudo concentrou-se nas emissões diretas oriundas da operação dos veículos. Contudo, ainda que se considere a inclusão das emissões indiretas associadas à geração de energia elétrica, o cenário de eletrificação mantém-se ambientalmente vantajoso, principalmente em razão da baixa intensidade de carbono da matriz elétrica brasileira. Conforme demonstra a figura 43, que apresenta a evolução da geração de eletricidade no Brasil por fonte entre 1985 e 2024, a matriz de geração elétrica do país é composta majoritariamente por fontes renováveis, com destaque para a energia gerada por hidrelétricas, que historicamente representa a principal fonte, e para o crescimento recente das fontes eólica, solar e de bioenergia.

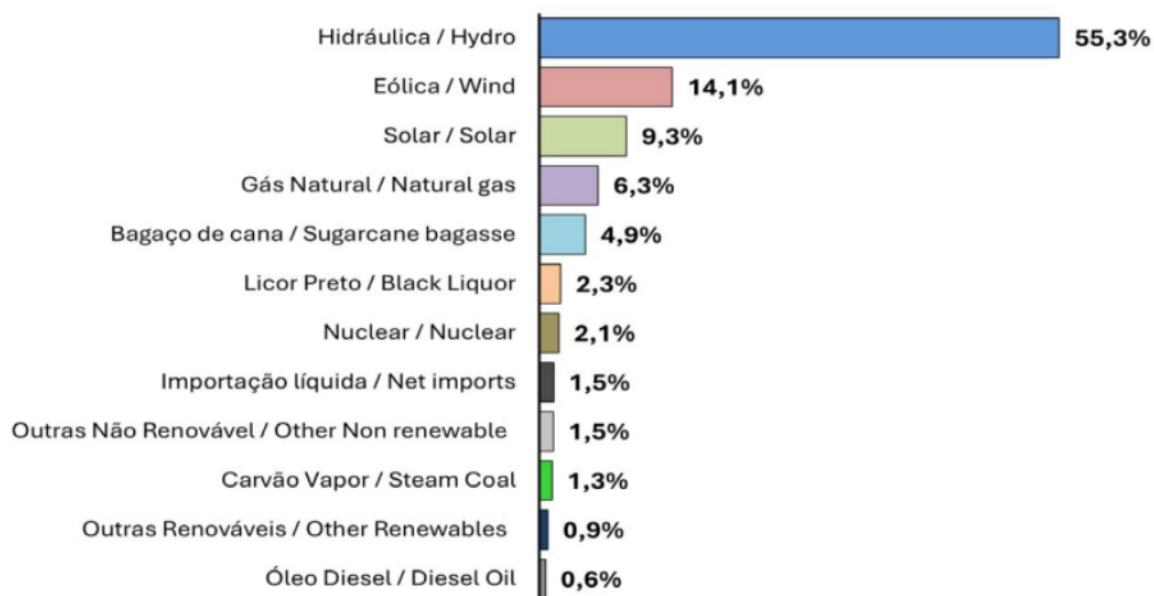


Figura 43: Oferta interna de energia elétrica por fonte.
Fonte: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2025.

7.2. ANÁLISE COMPARATIVA DO CONSUMO ENERGÉTICO

Com o objetivo de avaliar os impactos energéticos decorrentes da substituição da frota atual do sistema BRT por veículos elétricos, realizou-se uma análise comparativa entre os dois cenários operacionais. Para viabilizar essa comparação, o consumo de diesel foi convertido para quilowatt-hora (kWh), unidade utilizada na

estimativa do consumo elétrico dos trólebus, adotando-se como referência o poder calorífico inferior (PCI) do diesel com mistura de biodiesel, de 9,905 kWh por litro, conforme os fatores oficiais de conversão de 2025 disponibilizados pelo governo do Reino Unido (DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO, 2025).

A figura 44 ilustra a diferença de consumo energético mensal entre os dois cenários simulados.

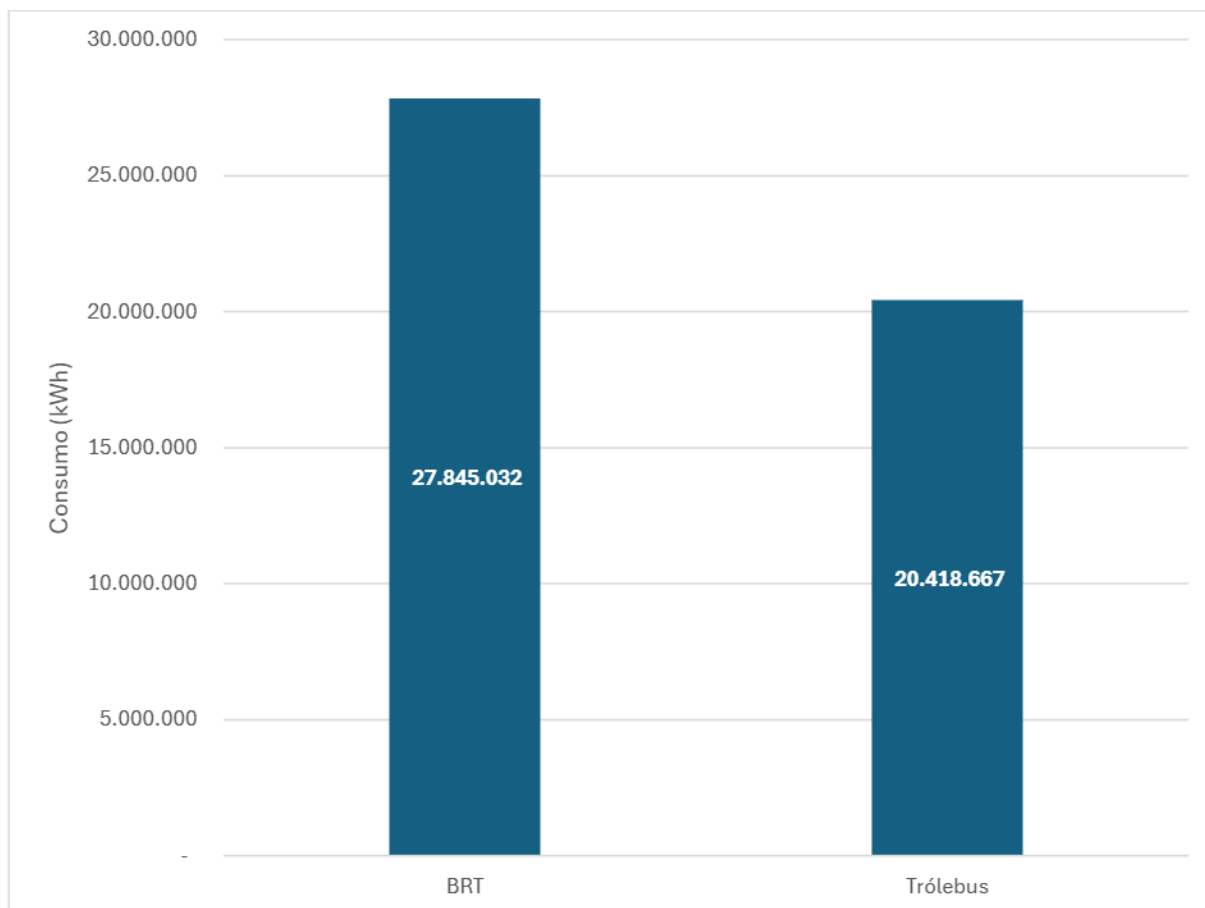


Figura 44: Comparativo do consumo energético mensal de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A substituição da frota de ônibus a diesel por trólebus no sistema BRT do Rio de Janeiro também resultaria em ganhos significativos do ponto de vista energético. Ao considerar a conversão do consumo de diesel para energia elétrica, estima-se que o sistema BRT apresentaria um consumo energético equivalente a aproximadamente 27,85 GWh por mês, o que corresponde a cerca de 334,14 GWh por ano. Com a substituição pelo sistema de trólebus, a demanda mensal passaria a ser de aproximadamente 20,42 GWh, totalizando cerca de 245,02 GWh por ano. Apesar do consumo expressivo de eletricidade, a adoção de motores elétricos permitiria uma redução de 26,7% no consumo energético equivalente total em comparação ao sistema movido a diesel, o que representaria uma economia de 7,43 GWh por mês e cerca de 89,12 GWh por ano.

A diferença de desempenho energético decorre principalmente da maior eficiência dos motores elétricos. Segundo Hjelkrem et al. (2020), enquanto a eficiência

de conversão energética dos motores de combustão interna varia entre 16% e 30%, os motores elétricos podem superar 80%, a depender das condições de operação.

No estudo, entretanto, a eficiência dos motores elétricos encontrada foi inferior. Considerando que a maior parte da frota de trólebus em operação em São Paulo tem mais de uma década de uso, é provável que esse fator tenha impactado os resultados observados, uma vez que, nos últimos anos, os motores elétricos passaram por avanços tecnológicos significativos, com melhorias na eficiência por meio do controle eletrônico e da integração com sistemas de frenagem regenerativa. Isso sugere que resultados ainda mais favoráveis poderiam ser alcançados com tecnologias mais recentes. Ainda assim, os resultados deste estudo evidenciam uma vantagem energética significativa em favor da tração elétrica, reforçando seu melhor desempenho operacional em relação ao sistema convencional a diesel.

Além disso, ao utilizar motores elétricos em lugar dos motores a combustão interna, o sistema teria o potencial de evitar o consumo de aproximadamente 2,8 milhões de litros de diesel B14 por mês, o que equivale a cerca de 33,7 milhões de litros por ano.

Conforme ilustrado na figura 45, entre os anos de 2021 e 2025, o Brasil manteve uma alta dependência da importação de óleo diesel, com volumes mensais frequentemente superando 1 milhão de metros cúbicos. Em contrapartida, as exportações de diesel mantiveram-se em níveis residuais ao longo de todo o período analisado. Diante desse cenário, a substituição do diesel por eletricidade representa uma estratégia eficaz para reduzir a dependência externa e fortalecer a segurança energética nacional.

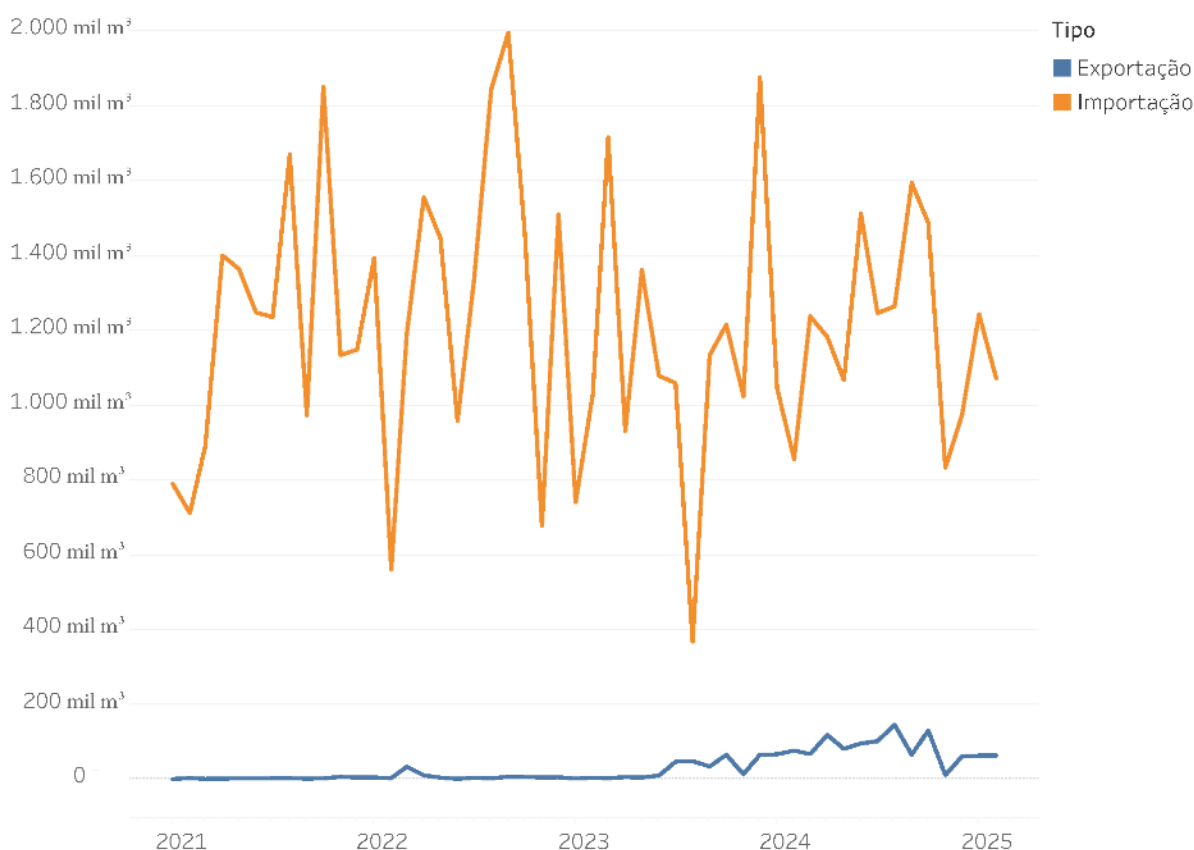


Figura 45: Evolução das importações e exportações de óleo diesel no Brasil (2021–2025).
Fonte: Adaptado de CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA, 2025.

7.3. ANÁLISE ECONÔMICA DO CONSUMO ENERGÉTICO

Além dos impactos ambientais e energéticos, a comparação entre o sistema BRT movido a diesel e o cenário alternativo com trólebus deve considerar também os custos diretos associados ao consumo de energia. Essa análise permite avaliar o potencial de economia financeira que pode ser alcançado com a substituição da matriz energética do transporte coletivo urbano.

A figura 46 apresenta a comparação dos custos energéticos mensais entre os dois sistemas.

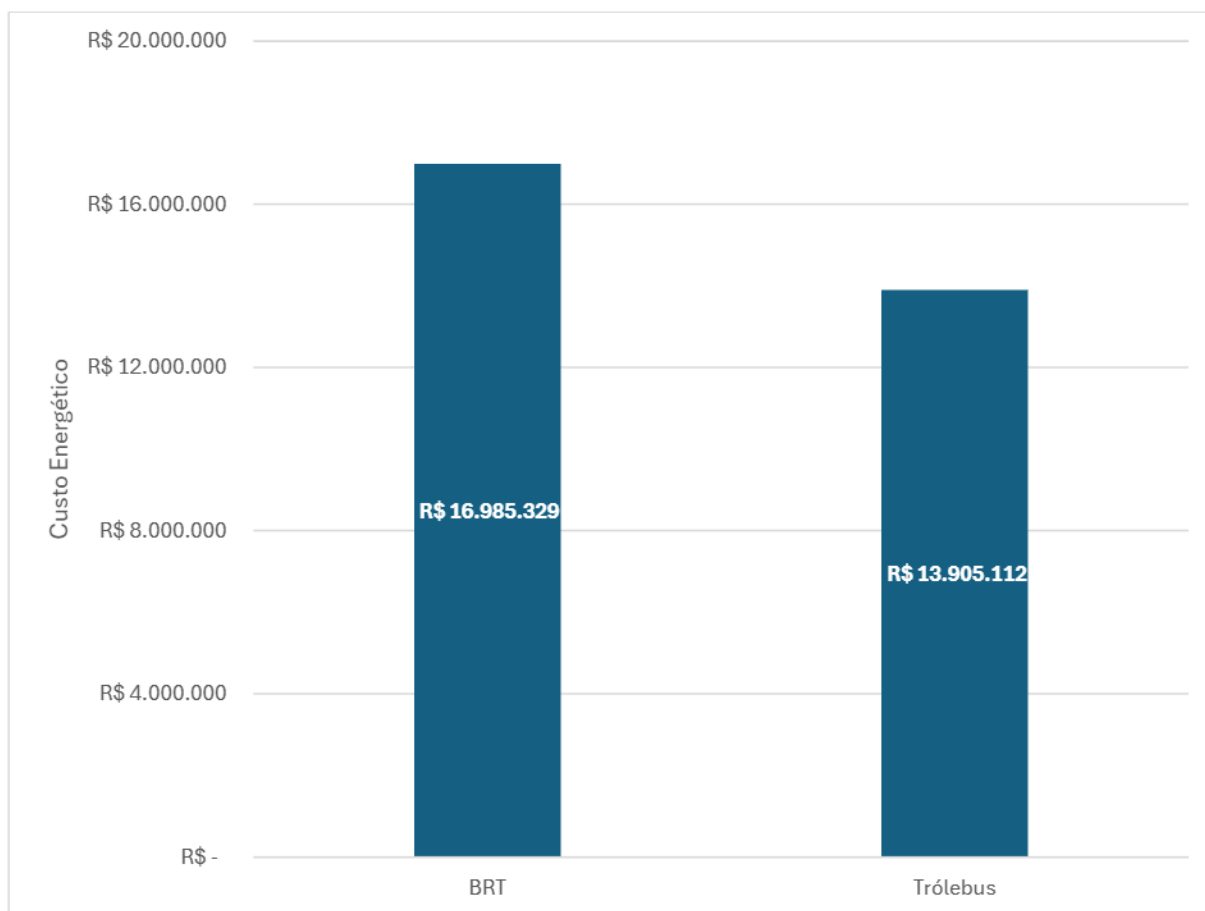


Figura 46: Comparativo do custo energético mensal de todos os lotes nos cenários com BRT movido a diesel e com trólebus.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A substituição dos ônibus movidos a diesel por trólebus, além de gerar benefícios ambientais e ganhos em eficiência energética, proporcionaria uma economia direta nos custos mensais com energia. O custo mensal estimado do sistema BRT a diesel, considerando um valor de R\$ 6,042 por litro, é de aproximadamente R\$ 17 milhões, enquanto o cenário com trólebus, com tarifa de energia elétrica de R\$ 0,681 por kWh, apresentaria um custo inferior, de cerca de R\$ 14 milhões por mês. Essa diferença representaria uma economia de aproximadamente R\$ 3 milhões mensais, equivalente a uma redução de 18% nas despesas operacionais com energia. Em termos anuais, o montante economizado alcançaria aproximadamente R\$ 37 milhões, contribuindo significativamente para a sustentabilidade financeira do sistema.

A sensibilidade do sistema às oscilações nos preços dos insumos energéticos é um fator estratégico relevante na avaliação de alternativas para o transporte urbano. A comparação entre os custos do diesel e da eletricidade evidencia uma maior volatilidade associada ao preço do diesel, cuja cotação sofre influência de fatores externos, como variações cambiais, flutuações na oferta internacional de petróleo e instabilidades geopolíticas. Por outro lado, embora o custo da eletricidade apresente, em geral, maior estabilidade em comparação ao diesel, ele também está sujeito a variações sazonais decorrentes do sistema de bandeiras tarifárias. Esse mecanismo reflete as condições de geração de energia no país, especialmente relacionadas aos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas, e pode resultar em acréscimos

temporários nas tarifas em contextos de escassez hídrica ou aumento da demanda energética.

Conforme ilustrado na figura 47, entre os anos de 2019 e 2023, o preço médio do diesel apresentou elevação expressiva, passando de R\$ 3,48 para R\$ 6,58 por litro em 2022, o que representa um aumento próximo de 90%, seguido por uma leve retração em 2023 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2025). Em contraste, a tarifa da eletricidade manteve-se relativamente estável, oscilando em torno de R\$ 0,70 por kWh ao longo de todo o período.

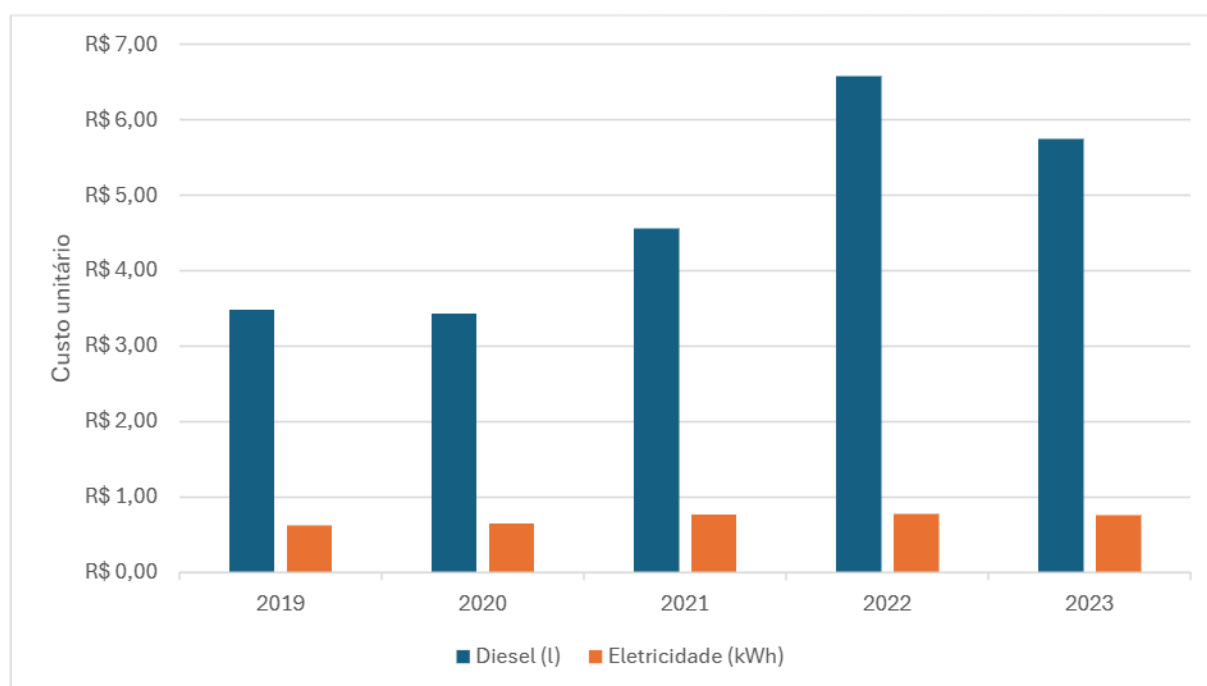


Figura 47: Comparação dos custos médios de diesel (R\$/litro) e eletricidade (R\$/kWh) no Brasil entre 2019 e 2023.

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2025.

A estabilidade tarifária no fornecimento de energia elétrica reforça a vantagem econômica da eletrificação do transporte público, sobretudo por favorecer maior previsibilidade orçamentária e reduzir a exposição às flutuações do mercado internacional de combustíveis fósseis.

Cabe ressaltar que este estudo não contemplou uma análise completa de viabilidade econômica, tampouco os custos detalhados de implantação do sistema trólebus. A estimativa apresentada refere-se exclusivamente aos custos diretos com energia, com base nos valores médios de comercialização do diesel e da eletricidade. A avaliação do custo total e do retorno sobre o investimento inicial necessário à eletrificação da frota exige uma abordagem específica, a ser aprofundada em estudos futuros. Esse investimento abrange duas frentes principais: a aquisição dos trólebus e a implantação da infraestrutura fixa de alimentação elétrica, composta pela rede aérea e subestações.

Ainda assim, trata-se de uma solução com potencial de implementação gradual, por lote, permitindo que os custos de transição sejam distribuídos ao longo do tempo. A possibilidade de compartilhar a infraestrutura viária existente entre os sistemas BRT e trólebus, operando no mesmo corredor, contribui para a redução de investimentos

iniciais e viabiliza uma adoção progressiva, com menores impactos operacionais e maior flexibilidade para ajustes ao longo do processo de eletrificação.

8. CONCLUSÃO

A intensificação das mudanças climáticas constitui um dos principais desafios ambientais contemporâneos, demandando ações efetivas para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Entre os maiores emissores de poluentes atmosféricos destaca-se o setor de transportes, especialmente o modal rodoviário, cuja elevada dependência de combustíveis fósseis compromete a qualidade do ar e acentua os riscos à saúde pública nas áreas urbanas.

Com papel estratégico no transporte público da cidade do Rio de Janeiro, o sistema *Bus Rapid Transit* (BRT) representa um avanço significativo em termos de mobilidade urbana. No entanto, sua operação com veículos movidos a diesel contribui para as emissões atmosféricas na região metropolitana. Dessa forma, a adoção de tecnologias de menor impacto ambiental no transporte urbano configura-se como uma estratégia fundamental para a mitigação dos danos ambientais e a promoção de cidades mais sustentáveis. A eletrificação do sistema BRT por meio de trólebus surge como uma alternativa promissora, uma vez que os motores elétricos não emitem gases poluentes no ponto de operação e são mais eficientes energeticamente que os motores de combustão interna.

Com o objetivo de quantificar os impactos ambientais da operação atual do BRT e embasar a avaliação do cenário alternativo com trólebus, utilizou-se a ferramenta ReFrota, desenvolvida pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), para estimar as emissões atmosféricas geradas pelo sistema.

Ao longo do estudo, os resultados obtidos demonstraram o potencial da substituição da frota movida a diesel por trólebus em promover ganhos expressivos.

No campo ambiental, observou-se a eliminação das emissões diretas de gases poluentes nos veículos, como dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), contribuindo para a melhoria da qualidade do ar urbano e a mitigação dos impactos climáticos.

Do ponto de vista energético, a maior eficiência dos motores elétricos dos trólebus permitiria uma redução de 26,7% no consumo total de energia equivalente, além de contribuir para diminuir a dependência externa de combustíveis fósseis, cuja importação representa uma vulnerabilidade econômica e geopolítica relevante para o país.

De igual modo, a análise econômica indicou que a eletrificação do sistema poderia gerar uma economia de aproximadamente 18% nos custos com insumos energéticos. Essa vantagem financeira se soma à menor sensibilidade do sistema elétrico às oscilações nos preços internacionais de combustíveis fósseis, conferindo maior previsibilidade orçamentária e resiliência ao planejamento do transporte público urbano em longo prazo.

Como sugestão para pesquisas futuras, embora os resultados obtidos neste trabalho indiquem o forte potencial da eletrificação do sistema BRT por meio de trólebus, é importante reconhecer as limitações e os desafios associados à adoção plena dessa tecnologia. A implantação do sistema demanda uma abordagem mais criteriosa, sobretudo quanto aos aspectos financeiros relacionados à infraestrutura elétrica e à aquisição dos veículos.

Além disso, fatores como os custos de manutenção e a análise do ciclo completo de emissões (*well-to-wheel*) devem ser considerados para uma avaliação mais abrangente dos impactos ambientais e energéticos da eletrificação.

Cabe ressaltar que este estudo se concentrou na comparação entre o sistema movido a diesel e o trólebus, não contemplando outras alternativas tecnológicas de eletrificação, como os ônibus elétricos a bateria, que têm sido escolhidos como alternativa aos ônibus convencionais em diversas cidades.

Por fim, espera-se que este estudo contribua para ampliar o debate sobre transporte sustentável no Brasil e contribua para a formulação gradual de medidas efetivas voltadas à promoção de uma mobilidade de baixo carbono nas grandes cidades brasileiras.

Referências

- AIRBUS. Hydrogen combustion, explained. **Airbus**, 2020. Disponível em: <<https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2020-11-hydrogen-combustion-explained>>. Acesso em: 02 set. 2022.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. Anuário NTU: 2023-2024. **NTU**, 2024. Disponível em: <<https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. Modernização Tecnológica da Frota do Transporte Coletivo Urbano 2024. **NTU**, 2024. Disponível em: <<https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638702247468920119.pdf>>. Acesso em: 28 maio 2025.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. Relatório geral 2018. **ANTP**, 2020. Disponível em: <<http://files.antp.org.br/simob/sistema-de-informacoes-da-mobilidade--simob--2018.pdf>>. Acesso em: 13 set. 2022.
- BAZANI, A. Trólebus 70 anos: Um meio de transporte que é viável para os dias de hoje e para o futuro. **Diário do Transporte**, 2019. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2019/04/21/trolebus-70-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-dias-de-hoje-e-para-o-futuro/>>. Acesso em: 17 nov. 2022.
- BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: [s.n.], 1988. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm>. Acesso em: 23 set. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012, institui as diretrizes da política nacional de mobilidade urbana**. Brasília, DF: [s.n.], 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm>. Acesso em: 23 set. 2022.
- BRASIL. **Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015. institui o estatuto da metrópole**. [S.l.]: [s.n.], 2015. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2015/lei/l13089.htm>. Acesso em: 23 set. 2022.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Editora Blucher, v. 1, 2018.
- CASA CIVIL. Renovação de Frota - Refrota. **gov.br**, 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/selecoes2025/eixos/cidades-sustentaveis-e-resilientes/renovacao-de-frota>>. Acesso em: 14 jun. 2025.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Painel CNI da Infraestrutura Brasileira - Petróleo - Derivados. **portaldaindustria**, 2025. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/cni/canais/infraestrutura/?tableau=3-petroleo&categoria=1&tabsiframe=infraestruturabrbrasil-petroleo>>. Acesso em: 30 jun. 2025.
- DENTON, T. **Veículos elétricos e híbridos**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

DEPARTMENT FOR ENERGY SECURITY AND NET ZERO. Greenhouse gas reporting: conversion factors 2025. **gov.uk**, 2025. Disponível em: <<https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2025>>. Acesso em: 23 jun. 2025.

DIAS, M. M. S. **Veículos elétricos e Híbridos**: Fundamentos, Características e Aplicações. São Paulo: Érica, 2020.

E-BUS RADAR. E-bus radar. **E-bus radar**, 2025. Disponível em: <<https://ebusradar.org/>>. Acesso em: 16 jun. 2025.

ELETRA. Trólebus. **eletrabus**, 2025. Disponível em: <<https://www.eletrabus.com.br/trolebus/>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2025 – Relatório Final. **EPE**, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relatório%20Final_BEN%202025.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FILHO, P. P. **Os motores a combustão interna**: para curso de máquinas térmicas, engenheiros, técnicos e mecânicos em geral que se interessam por motores. Belo Horizonte: Lemi, 1983.

GLOBAL BRT DATA. Global BRT Data. **Global BRT Data**, 2025. Disponível em: <<https://brtdata.org>>. Acesso em: 06 maio 2025.

HJELKREM, O. A.; ARNESEN, P.; AARSETH BØ, T. Estimation of tank-to-wheel efficiency functions based on type approval data. **sciencedirect**, 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261920309752>>. Acesso em: 25 maio 2025.

IBAMA. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). **ibama.gov.br**, 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Censo demográfico 2022: Malha de Setores Censitários definitivos. **IBGE**, 2022. Disponível em: <<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/41901-censo-2022-87-da-populacao-brasileira-vive-em-areas-urbanas>>. Acesso em: 13 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Cidades. **ibge.gov.br**, 2023. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/rio-de-janeiro/panorama>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE. ReFrota: calculadora de emissões de frotas de ônibus. **IEMA**, 2021. Disponível em: <<https://energiaeambiente.org.br/produto/refrota-calculadora-de-emissoes-de-frotas-de-onibus>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

JOINT RESEARCH CENTRE. GHG emissions of all world countries. **JRC**, 2024. Disponível em: <<https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/dd80d863-6a63-11ef-a8ba-01aa75ed71a1/language-en>>. Acesso em: 07 maio 2025.

MAHLE. Curso Mahle Metal Leve: Motores de combustão interna. **Mahle-aftermarket**, 2019. Disponível em: <<https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/catalogs/manuais-tecnicos/manual-curso-de-motores-2019.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2022.

MARTINS, J. M. M. **Motores de combustão interna**. [S.l.]: Publindústria, 2006.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. Primeiro Relatório Bial de Transparência do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. **Gov.br**, Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-bienais-de-transparencia-btrs/Primeiro_Relatorio_Bienal_Transparencia_Brasil_BTR_2024_PORT.pdf>.

Acesso em: 06 maio 2025.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. SIE Brasil / Brasil / Relatórios / Tabelas / Socioeconomia / Preço Médio Anual de Fontes de Energia. **MME**, 2025. Disponível em: <<https://www.mme.gov.br/SIEBRASIL/consultas/reporte-dato42-jerarquizado.aspx?oc=473&or=474&ss=2&v=1>>. Acesso em: 30 jun. 2025.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. A NDC DO BRASIL. **gov.br**, 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/noticias/brasil-entrega-a-onu-nova-ndc-alinhada-ao-acordo-de-paris/ndc-versao-em-portugues.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

MOBI-RIO. Prefeitura do Rio completa 4 anos à frente do BRT, 2025. Disponível em: <<https://mobi-rio.rio.br/noticias/prefeitura-do-rio-completa-4-anos-a-frente-do-brt>>.

Acesso em: 14 jun. 2025.

MORAN, M. J. et al. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

OUR WORLD IN DATA. Global warming potential of greenhouse gases relative to CO2. **Our World in Data**, 2023. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/global-warming-potential-of-greenhouse-gases-over-100-year-timescale-gwp>>. Acesso em: 11 maio 2025.

OUR WORLD IN DATA. Energy consumption by source, Brazil. **Our World in Data**, 2024. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-country?stackMode=absolute&country=~BRA>>. Acesso em: 09 maio 2025.

OUR WORLD IN DATA. Energy consumption by source, World. **Our World in Data**, 2024. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/energy-consumption-by-source-and-country?stackMode=absolute>>. Acesso em: 09 maio 2025.

OUR WORLD IN DATA. Greenhouse gas emissions by sector, World. **Our World in Data**, 2024. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/ghg-emissions-by-sector>>. Acesso em: 29 maio 2025.

OUR WORLD IN DATA. Annual temperature anomalies relative to the pre-industrial period. **Our World in Data**, 2025. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly>>. Acesso em: 12 maio 2025.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. MUDANÇA DO CLIMA 2023 - Relatório Síntese. **gov.br**, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/copy_of_IPCC_Longer_Report_2023_Portugues.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

RIO DE JANEIRO (CIDADE). Plano diretor da cidade do Rio de Janeiro. **planodiretor-pcrj**, 2024. Disponível em: <<https://planodiretor-pcrj.hub.arcgis.com/>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SECRETARIA MUNICIPAL DE SAÚDE DO RIO DE JANEIRO. Relatório de Segurança Viária 2023. **saúde.prefeitura**, 2025. Disponível em: <<https://saude.prefeitura.rio/wp->

content/uploads/sites/47/2025/01/Livro_RelatorioDeSegurancaViaria2023_Miolo_20240529-BaixaResolucao.pdf>. Acesso em: 28 abr. 2025.

SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR). Estudo de Modelagem Econômico-Financeira da Concessão de Operação do Sistema BRT – v.11. **transportes.prefeitura**, 2023. Disponível em: <<https://transportes.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/31/2023/05/SMTR-BRT-Operacao-Estudo-de-Modelagem-Economico-Financeira-v11-2023-05-15.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SECRETARIA MUNICIPAL DE TRANSPORTES (SMTR). Licitação Sistema BRT - EDITAL E ANEXOS. **transportes.prefeitura**, 2023. Disponível em: <<https://transportes.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/31/2023/05/SMTR-BRT-Operacao-EDITAL-E-ANEXOS-v22-2023-05-15.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.

SEEG. ENTENDA AS ESTIMATIVAS. **SEEG**, 2019. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/entenda-as-estimativas>>. Acesso em: 17 nov. 2022.

SEEG. Análise Das Emissões de 1970-2023 Gases de Efeito Estufa E Suas Implicações Para as Metas Climáticas Do Brasil. **SEEG**, 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2025.

SEEG. Observatório do Clima. **SEEG**, 2024. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/dados>>. Acesso em: 01 abr. 2025.

SEMOVE. Relatório de Sustentabilidade Semove. **Semove**, 2024. Disponível em: <<https://semove.org.br/wp-content/uploads/2024/02/Relatório-de-Sustentabilidade-Semove-página-simples.pdf>>. Acesso em: 22 abr. 2025.

SENRA, K. V.; BIENENSTEIN, G. Espaço e Economia. **journals.openedition**, 2023. Disponível em: <<https://journals.openedition.org/espacoeconomia/24828>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SIEMENS. Road transportation. **Siemens**, 2025. Disponível em: <<https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/technology/transportation-technology/road-transportation.html>>. Acesso em: 14 jun. 2025.

SISCLIMA. Inventário de Emissões de Gases de Efeito Estufa – 2020-2021. **ambienteclima**, 2023. Disponível em: <https://ambienteclima.prefeitura.rio/wp-content/uploads/sites/81/2023/12/InventarioGEE2020_2021.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2025.

SOUZA, J. P. S. T. D. **Análise de um motor à combustão interna: simulação numérica do ciclo Otto**. Universidade de Brasília - UnB. Brasília, DF. 2016.

SPTRANS. Manual de Identidade Visual - Pintura de Veículo. **sptrans**, 2022. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/media/12766/ve-01-700-1-1-r1-padron-caio-millennium_iii_brt-scania_k270-trolebus.pdf?v=11082022_1149>. Acesso em: 14 jun. 2025.

TOMTOM. Brazil traffic report. **Tomtom**, 2025. Disponível em: <<https://www.tomtom.com/traffic-index/brazil-country-traffic/>>. Acesso em: 13 jun. 2025.

UNFCCC. PARIS AGREEMENT. **unfccc.int**, 2015. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

UNION INTERNATIONALE DES TRANSPORTS PUBLICS. Global Trolleybus Figures 2025. **uitp**, 2025. Disponível em: <<https://cms.uitp.org/wp/wp->

content/uploads/2025/05/20250523_Global-Trolleybus-Figures_Statistics-Brief_WEB.pdf>. Acesso em: 14 jun. 2025.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Emissions Gap Report 2024: No more hot air ... please! **UNEP**, 2024. Disponível em: <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46404>>. Acesso em: 12 maio 2025.

VASCONCELLOS, E. E. A. D.; CARVALHO, C. H. R. D.; PEREIRA, R. H. M. **Transporte e mobilidade urbana**. Brasília, DF: CEPAL, 2011. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/td_1552.pdf>. Acesso em: 13 set. 2022.

WEG. Guia de Especificação: Motores Elétricos. **WEG**, Jan 2021. Disponível em: <<https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/h32/hc5/WEG-motores-eletricos-guia-de-especificacao-50032749-brochure-portuguese-web.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2022.

ZHU, Z. Q.; HOWE, D. **Electrical Machines and Drives**. IEEE. [S.l.], p. Vol. 95, No. 4. 2007.