

RELATÓRIO TÉCNICO – P2

Projeto:

Desenvolvimento de metodologia de baixo custo para mensurar, reportar e verificar as emissões CO₂, MP e Consumo Energético em Transportes Urbanos.

Agência de Fomento:

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro – FAPERJ.

SEI Processo:

260003/011958/2021

Proponente:

Cintia Machado de Oliveira

Equipe técnica:

Felipe do Carmo Amorim

Raphael Jose Elino Da Silveira

Rodrigo Rodrigues de Freitas

Sumário

Projeto	3
Resumo do Projeto	3
Objetivo do Projeto	3
Resultados Esperados	3
Descrição do Produto P2	4
Resultados Parciais	4
1. Diagnóstico das regiões de estudo	4
1.1. Noroeste Fluminense	5
1.2. Norte Fluminense	7
1.3. Centro Fluminense	10
1.4. Baixadas Litorâneas	12
1.5. Sul Fluminense	14
1.6. Metropolitana do Rio de Janeiro	17
2. Emissões de CO ₂ e eletrificação da frota como alternativa para redução das emissões	20
2.1 Eletrificação da frota	21
2.2 Congestionamentos e velocidade	27
3. Importância da renovação da frota: tempo de uso do motor	29
3.1 Consumo de combustível e emissões	29
3.3 Fatores que influenciam no aumento das emissões	34
3.4 Decaimento do catalisador	35
3.5 Emissões devido às mudanças de tecnologia	35
3.6 Emissões devido ao tempo de uso e <i>mileage</i>	36
3.7 Métodos de cálculo da variação das emissões devido ao tempo de uso do veículo	36
3.8 Novas Tecnologias e Soluções Sustentáveis	39
4. Processo metodológico	40
4.1 Estimativa de Gases de Efeito Estufa – principais referências	41
4.2 Estimativa de consumo de combustível e emissões de CO ₂ – modelos mistos	44
4.3 Metodologia	46
5. Resultados – Estado do Rio de Janeiro	51
Indicadores de Desempenho	57
Conclusões	57
Referências	58
Anexo I: Frota Circulante – sem desconto de sucateamento (SENATRAN)	65
Anexo II: Vendas de Diesel (M ³) - Agência Nacional de Petróleo (ANP)	66
Anexo III: Intensidade de uso de veículos a diesel em km/ano	67
Anexo IV – Autonomia de veículos a diesel	68
Anexo V – Fatores de emissão de MP e CO ₂ e Taxa de depreciação do motor	69
Anexo VI – Fatores de emissão de MP e CO ₂ e Taxa de depreciação do motor	70

Projeto

Desenvolvimento de metodologia de baixo custo para mensurar, reportar e verificar as emissões CO₂, MP e Consumo Energético em Transportes Urbanos. Processo SEI: 260003/011958/2021.

Resumo do Projeto

O impacto na adição do biodiesel no combustível para transporte e sua relação entre dióxido de carbono (CO₂), material particulado (MP) e consumo energético tem apresentado lacunas na busca por pesquisas que utilizam uma abordagem diferenciada para que todas as cidades possam mensurar as emissões que prejudica o meio ambiente, sem a necessidade de mensurar a frota circulante. O elevado custo de pesquisa para as cidades não permite que muitas calculem esses dados, a fim de desenvolver e analisar a série histórica e o impacto de políticas de mitigação de emissões. A metodologia apresenta um processo para estimar as emissões divididas em quatro etapas como: venda de diesel, fluxo de veículos que entram e saem da cidade, distância viajada e cálculos das emissões de CO₂, MP e consumo energético. Pesquisas anteriores apontam que políticas de aumento do consumo de biodiesel apenas atenua as emissões de CO₂, MP, pois pneus, freios e pista possuem partículas que podem contribuir para o aumento de mortes por doenças respiratórias.

Objetivo do Projeto

A pesquisa busca desenvolver uma metodologia de baixo custo, para que as cidades de médio a grande porte possam mensurar e avaliar as emissões de CO₂, MP e consumo energético, de forma a desenvolver políticas de boas práticas e mitigar os danos ao meio ambiente. Como objetivos específicos, pretende-se verificar a relação das emissões locais com número de casos de doenças respiratórias e desenvolver um processo tecnológico que seja prático e de fácil utilização para o monitoramento das emissões, a fim de comparar os períodos e os impactos sazonais.

Resultados Esperados

Como o enfoque desta pesquisa é tornar as cidades mais sustentáveis através da Logística de Transportes Urbanos (transporte de carga e passageiros em área urbana) espera-se como resultados:

- a) Incentivar as cidades a conhecerem suas emissões relacionadas ao transporte urbano. O propósito é mapear os principais problemas causados pelas emissões e desenvolver políticas públicas e parcerias regionais com entes privados para soluções sustentáveis que envolvam os aspectos econômico, social e ambiental. Neste caso, a pesquisa utilizará de forma intrínseca para mensurar as emissões a metodologia da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) e conformidade com a discussão do Plano Setorial de Transporte e de Mobilidade Urbana para Mitigação da Mudança do Clima (PSTM);
- b) Desenvolver conhecimento através de relatórios para que o desenvolvimento urbano seja de forma sustentável, e que no longo prazo, as questões fundamentais de qualidade de vida alcancem toda a sociedade, de maneira a organizar a seleção dos dados, aplicação do método e validação através de *backtests* computacionais;

- c) Incrementar procedimentos tecnológicos de verificação das emissões relacionadas a Logística dos Transportes Urbanos e o desenvolvimento de banco de dados, a fim de comparar as emissões antes e depois de implantação de boas práticas, esse processo é conhecido como *business as usual* (BAU). Neste caso, poderão ser utilizadas outras metodologias que ao longo do projeto possam demandar.

Descrição do Produto P2

No que tange ao escopo mapeado para o segundo ano da pesquisa em questão, as atividades foram desenvolvidas conforme cronograma de execução destacado na proposta do projeto.

Considerando então a conclusão de tais tarefas, o relatório parcial aqui apresentado objetiva sintetizar os resultados parciais obtidos, bem como divulgar alguns indicadores que permitem avaliar o desempenho do projeto na fase inicial. O documento também aponta as dificuldades surgidas ao longo do desenvolvimento do estudo e as conclusões com as recomendações e sugestões para a próxima fase a ser executada.

Resultados Parciais

Esta seção apresenta os resultados parciais do Produto P2, de acordo com as atividades mapeadas para o segundo ano da pesquisa.

1. Diagnóstico das regiões de estudo

Desde 1990, o Sistema Estatístico Nacional adota o modelo de mesorregiões e microrregiões geográficas para divisão regional do Brasil, uma vez que permite, além da divulgação de dados estatísticos, a compreensão da organização do território nacional com maior diversidade e dinamicidade quanto aos critérios utilizados (IBGE, 2017).

Uma mesorregião se caracteriza por uma área individualizada, em uma Unidade da Federação (UF), que organiza seu espaço geográfico a partir das dimensões do processo social, do quadro natural e da rede de comunicação e de lugares, sendo esta última um elemento da articulação espacial. Microrregiões, por sua vez, configuram um conjunto de municípios que integra a mesorregião e possuem uma série de atributos, não necessariamente uniformes, que identificam as características e atividades realizadas a nível local (IBGE, 2017).

O Estado do Rio de Janeiro, objeto de estudo da presente pesquisa, é constituído por 6 (seis) mesorregiões, conforme aponta a Figura 1.1.

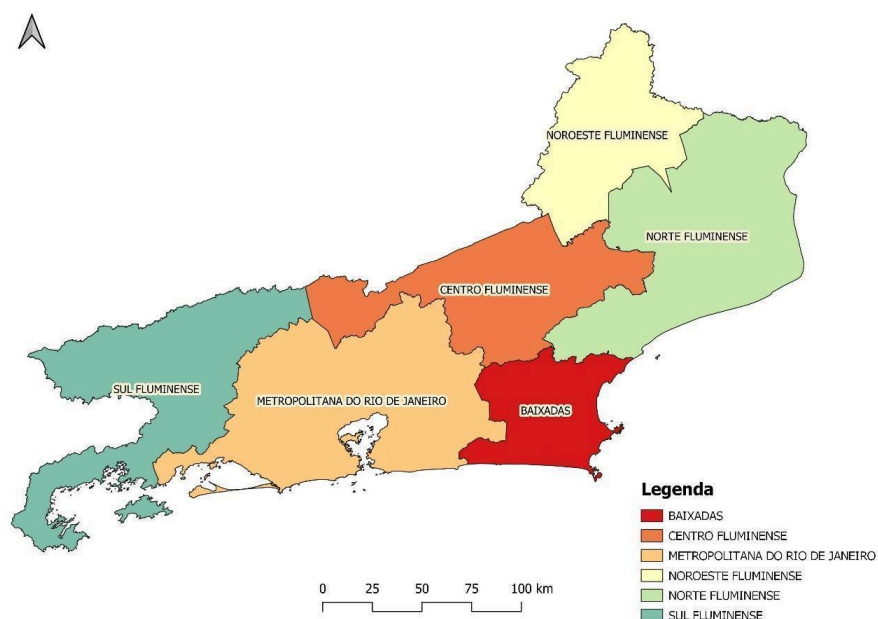


Figura 1.1. Mesorregiões geográficas do Estado do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

Cada mesorregião possui uma realidade acerca de sua formação e desenvolvimento, delimitando-se como uma identidade regional. Destaca-se aqui as particularidades de cada área bem como as cidades de interesse do estudo, com destaque para as variáveis de impacto direto no setor de transportes – crescimento populacional, volume de veículos e consumo de combustível.

1.1. Noroeste Fluminense

O Noroeste Fluminense faz fronteira com os estados de Minas Gerais e do Espírito Santo e é composto por 13 (treze) municípios: Aperibé, Bom Jesus do Itabapoana, Cambuci, Italva, Itaocara, Itaperuna, Laje do Muriaé, Miracema, Natividade, Porciúncula, Santo Antônio de Pádua, São José de Ubá e Varre-Sai – ver Figura 1.2.

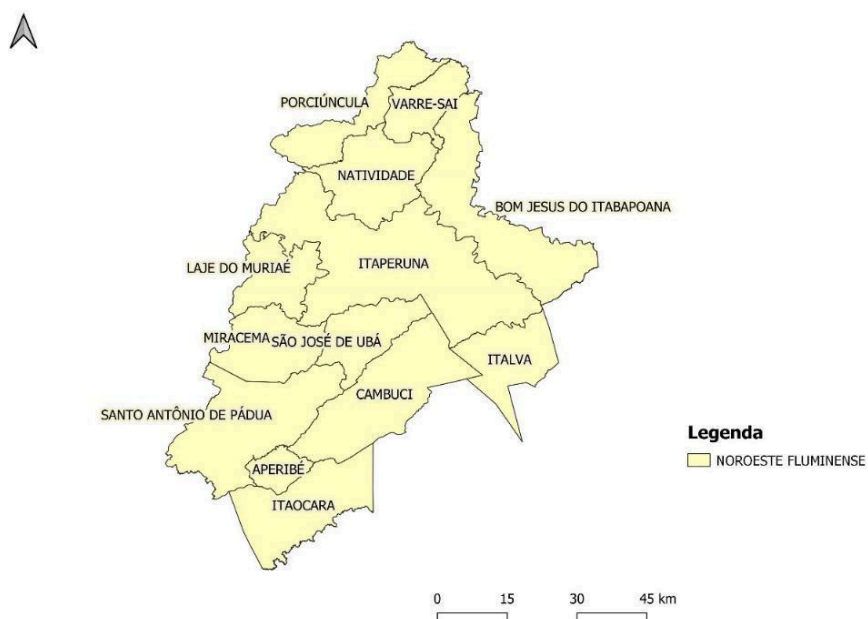


Figura 1.2. Mesorregião Noroeste Fluminense. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

O Noroeste Fluminense deriva de um contexto econômico, relacionado à região Norte Fluminense, os rearranjos das atividades que impulsionam a situação financeira de seu espaço territorial são marcados pela significativa participação da agropecuária (SIQUEIRA, 2015). Os municípios que atualmente compõem as mesorregiões Norte e Noroeste Fluminense pertenciam ao território de Campos, que fora dividido até a formação da configuração hoje existente (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f).

Dos municípios de destaque na região, pontua-se Itaperuna. Por conta da expansão da cafeicultura, a partir do final do século XIX, houve uma intensa concentração de atividades comerciais e de serviços no município, além da produção de outras culturas, como milho e arroz. Em 1940, no entanto, com o declínio da cafeicultura, começou-se a desenvolver a pecuária de corte e, posteriormente, a produção leiteira, que atualmente conta com a presença de uma fábrica de laticínios com incentivos do governo do Estado do Rio de Janeiro (SIQUEIRA, 2015; SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f). O município é ainda referência no setor de serviços relacionados à saúde e educação (SIQUEIRA, 2015), além de atrair viagens por conta da estância hidromineral de Raposo, pertencente ao distrito (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f).

No que tange à população, Itaperuna possui 101.041 habitantes, conforme último censo de 2022, sendo a densidade demográfica equivalente a 91,30 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2023). Comparado ao censo de 2010, o município apresenta uma taxa de crescimento populacional de 5,43% – ver Figura 1.3. Este percentual deriva, dentre outros aspectos, da expansão das atividades comerciais e presença de empresas e indústrias de grande porte, além de apresentar estabelecimentos formais em agropecuária, extração vegetal, caça e pesca (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f). No ramo educacional, o município dispõe de institutos federais para cursos de nível médio e superior, e de formação profissional pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial – SENAI, o que fomenta a migração de pessoas para a região.

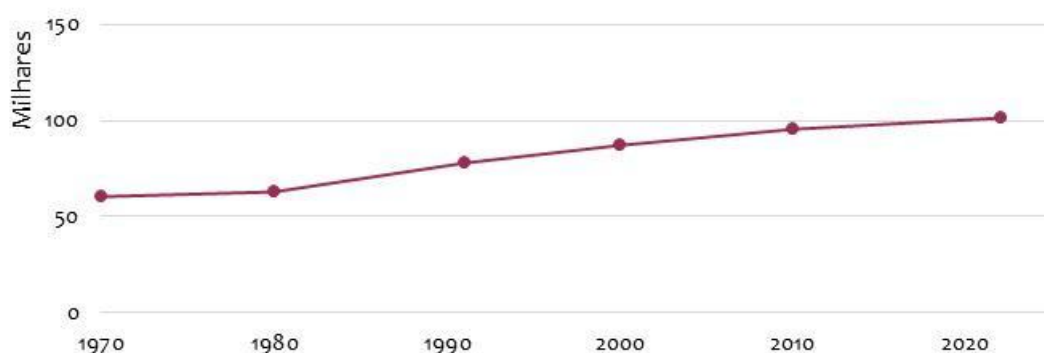


Figura 1.3. Crescimento populacional de Itaperuna. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Na área de transportes, Itaperuna registrou uma frota de 50.185 veículos em dezembro de 2022, o que equivale a, aproximadamente, 32% do total observado no Noroeste Fluminense (SENATRAN, 2023). Esse percentual reflete um comportamento similar entre os tipos de veículos, incluindo de passageiros e de carga. O crescimento no número de veículos, assim como no acréscimo de habitantes da região, pode estar relacionado à empregabilidade na região e à quantidade de indivíduos economicamente ativos, que se tornam potenciais consumidores.

Cabe pontuar ainda que a mesorregião concentra cerca de 2% dos veículos de carga encontrados no Estado do Rio de Janeiro (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f). Considerando o Panorama PELC RJ 2045, que se refere a um plano estratégico de logística de cargas no Estado, há uma discussão sobre a construção da Estrada do Contorno, no município de Itaperuna, para a redução do tráfego de caminhões e carretas pesadas no centro da cidade. Esta pauta amplia a possibilidade de um núcleo logístico na região e aumenta a capacidade da infraestrutura sobre a demanda crescente (FONSECA, 2021). Referente aos combustíveis, o consumo em Itaperuna é majoritariamente voltado à gasolina e etanol, seguido do diesel (SENATRAN, 2023).

Além de Itaperuna, destaca-se o município de Santo Antônio de Pádua, que dispõe de terras férteis para a cultura de arroz, do milho e da cana-de-açúcar. No setor industrial, Santo Antônio de Pádua conta com indústrias de extração de rochas ornamentais e de papel. Outras atividades que promovem a economia da região estão ligadas à pecuária leiteira, o comércio e o turismo (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f).

O município de Santo Antônio de Pádua possui 41.325 residentes e uma densidade demográfica de 68,46 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2023). O crescimento populacional da cidade foi de 1,81% comparativamente ao ano de 2010, conforme Figura 1.4.

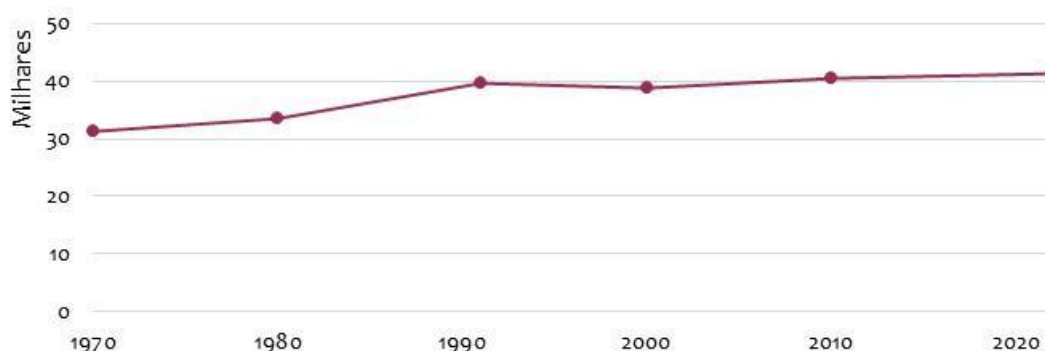


Figura 1.4. Crescimento populacional de Santo Antônio de Pádua. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Este crescimento pode estar relacionado às atividades existentes na região. Por conta de sua agricultura produtiva, a produção de alimentos e produtos agrícolas podem criar empregos e atrair investimentos para a área. Outra razão é que Santo Antônio de Pádua possui instituições de ensino público e privado e cursos profissionalizantes, o que aumenta a atratividade para residir no município, uma vez que este também concentra uma parcela significativa de oportunidades de emprego (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017f).

No que tange aos transportes, a cidade concentra 14% dos veículos do Noroeste Fluminense, sendo o maior número de registros associado ao transporte individual motorizado. Santo Antônio de Pádua é o segundo em quantidade de frota e em emissões de carteira de habilitação que, somados à economia ativa na região, ampliam o consumo por veículos particulares (DENATRAN, 2022). Em concordância aos dados de Itaperuna, o consumo de gasolina e etanol também é o mais expressivo (SENATRAN, 2023).

1.2. Norte Fluminense

Conforme apresentado na Figura 1.5, o Norte Fluminense é composto por 9 (nove) municípios: Campos dos Goytacazes, Carapebus, Cardoso Moreira, Conceição de Macabu, Macaé, Quissamã, São Fidélis, São Francisco de Itabapoana e São João da Barra.



Figura 1.5. Mesorregião Norte Fluminense. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

De acordo com a Secretaria de Estado da Casa Civil do Rio de Janeiro (2017h), o processo de ocupação da mesorregião Norte Fluminense deriva, principalmente, do desenvolvimento da economia inerente à cana-de-açúcar. Em seguida, no século XX, a dinâmica econômica passou a estar centrada na extração mineral e na descoberta de poços de petróleo na Bacia de Campos. O início das operações no setor de óleo e gás garantem à localidade uma relevância significativa no contexto regional, dada a empregabilidade e atratividade de investimentos.

Dos municípios pertencentes ao Norte Fluminense, pode-se destacar Campos dos Goytacazes, que é a maior em território do Estado do Rio de Janeiro e onde se situa a Bacia de Campos, responsável por mais de 80% da produção nacional de petróleo. Pontua-se ainda a participação do setor de comércio na economia municipal, com formação de renda e oferta de postos de trabalho (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPOS DOS GOYTACAZES, 2023). Outro aspecto importante é que cerca de 62,5% do PIB regional é produzido pelo município (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017h).

Campos dos Goytacazes possui uma população de 483.551 indivíduos, conforme dados do último censo, e uma densidade populacional de 119,91 habitantes por quilômetro quadrado. O município apresenta uma taxa de crescimento populacional de, aproximadamente, 4,2% em comparação com o censo de 2010 (IBGE, 2023) – ver Figura 1.6.

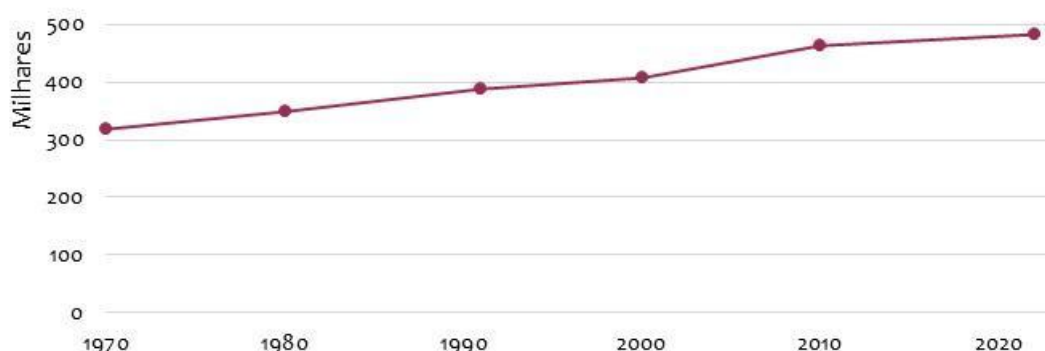


Figura 1.6. Crescimento populacional de Campos dos Goytacazes. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Parte da concentração de pessoas no município se dá em função da expansão das atividades realizadas na região e da presença de um polo educacional, em que pesquisas são desenvolvidas visando ao desenvolvimento regional, sendo o setor de petróleo e gás natural o maior beneficiado em função da mão-de-obra qualificada (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPOS DOS GOYTACAZES, 2023).

Uma vez que o centro da cidade se configura como uma área de conexão a demais localidades, percebe-se pontos de saturação do sistema viário, com um crescimento da frota circulante e impactos no tráfego (PREFEITURA MUNICIPAL DE CAMPOS DOS GOYTACAZES, 2023). Em 2022, mais precisamente no mês de dezembro, o SENATRAN (2023) indicou um quantitativo de 240.984 veículos em Campos dos Goytacazes, representando mais da metade da frota do Norte Fluminense, tanto no transporte de passageiros como no transporte de cargas. O diesel representa, aproximadamente, 7% do consumo de combustível no município, enquanto a gasolina e o etanol somam mais de 73%.

Macaé representa um outro município de grande relevância na mesorregião do Norte Fluminense, em que se localiza o Porto de Imbetiba, de propriedade da Petrobras, cujas atividades são de apoio às operações de extração de petróleo na Bacia de Campos (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017h). O setor de educação também desempenha um papel importante na cidade, consolidando Macaé como Cidade do Saber e do Conhecimento (Prefeitura Municipal de Macaé, 2023). Em termos de território, Macaé possui uma área total de 1.216,989 quilômetros quadrados, correspondentes a 12,5% da área da Região Norte Fluminense (IBGE, 2023).

Com uma população estimada, segundo o IBGE (2023), em 246.391 pessoas e 202,46 habitantes por quilômetro quadrado em 2022, Macaé atua na oferta de equipamentos públicos de saúde, educação e infraestrutura para os indivíduos que migram para o município em busca de uma oportunidade de trabalho (PREFEITURA MUNICIPAL DE MACAÉ, 2023). Em função de sua atratividade para sediar multinacionais do petróleo e atrair investimentos e mão de obra especializada, há uma elevada concentração de pessoas na região. De acordo com o IBGE, a taxa de crescimento populacional do município é de cerca de 19,17%, em comparação com o censo de 2010, como apresentado na Figura 1.7.

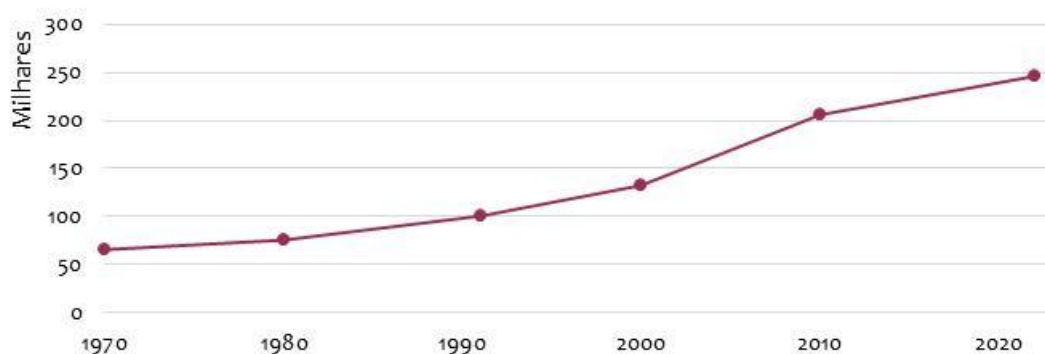


Figura 1.7. Crescimento populacional de Macaé. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

A Rodovia Amaral Peixoto é o principal meio de escoamento da produção e transporte de passageiros, o que aumenta a circulação de veículos na cidade. Em 2022, constatou-se uma taxa de crescimento da frota do município em cerca de 60%, comparado ao censo de 2010. Tal percentual se dá, principalmente, pela participação de automóveis e caminhões. Similar a Campos dos Goytacazes, a gasolina e etanol são mais usuais e o diesel equivale a 7%, aproximadamente, do consumo de combustível na cidade.

1.3. Centro Fluminense

O Centro Fluminense é composto por 16 (dezesesseis) municípios: Areal, Comendador Levy Gasparian, Paraíba do Sul, Sapucaia, Três Rios, Cantagalo, Carmo, Cordeiro, Macuco, Bom Jardim, Duas Barras, Nova Friburgo, Sumidouro, Santa Maria Madalena, São Sebastião do Alto e Trajano de Moraes. A Figura 1.8 demonstra o mapa da mesorregião.

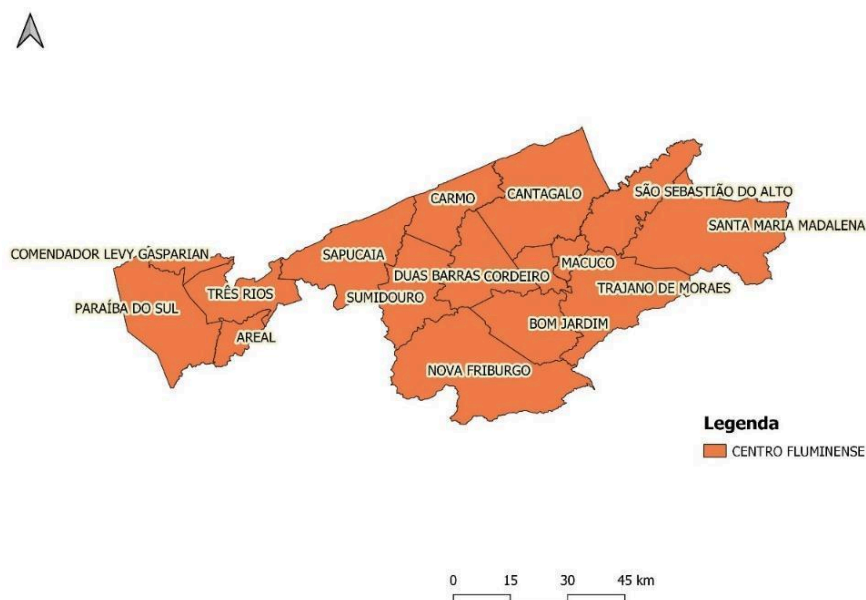


Figura 1.8. Mesorregião Centro Fluminense. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

De acordo com a Secretaria de Estado da Casa Civil do Rio de Janeiro (2017a), a posição geográfica privilegiada da região favoreceu o desenvolvimento das indústrias metal mecânica e a de alimentos vinculada à agropecuária, atuando, sobretudo, com o beneficiamento dos produtos.

Esta região possui intensa participação do setor industrial na sua economia, principalmente por conta do município de Três Rios, que representa um importante entroncamento no território fluminense, por conta do fácil acesso à BR-040 para Belo Horizonte, Brasília e Rio de Janeiro, e à BR-393 para São Paulo e Vitória.

Segundo dados do IBGE (2023), a população do município de Três Rios no último censo, em 2022, é de 78.346 pessoas, o que representa um aumento de 1,65% em comparação com o ano de 2010, dispondo ainda de uma densidade demográfica de 242,68 habitante por quilômetro quadrado – ver Figura 1.9.

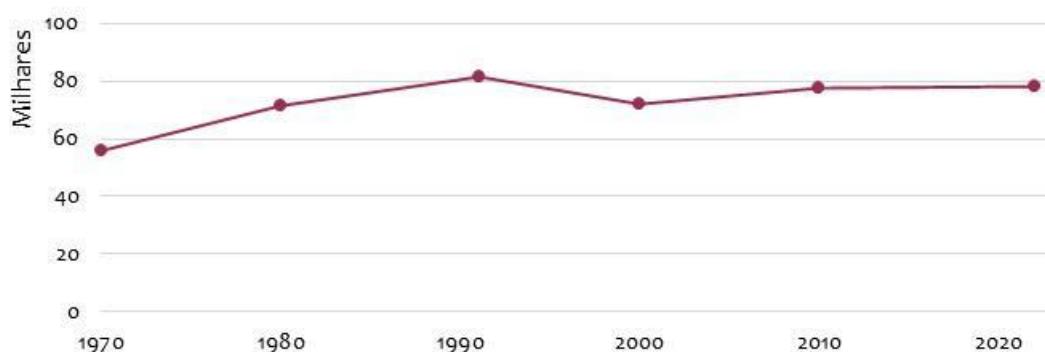


Figura 1.9. Crescimento populacional de Três Rios. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Cabe destacar que a concentração populacional reflete o potencial de desenvolvimento econômico da região em função da forte presença de fábricas. Para mais, o município dispõe de unidades e polos de faculdades e universidades para formação superior, o que contribui para a formação e qualificação de mão de obra especializada. Há ainda o Sicomércio Três Rios (Sindicato do Comércio Varejista de Três Rios, Paraíba do Sul, Areal, Comendador Levy Gasparian), que é uma entidade que visa garantir às empresas representadas as melhores condições a partir da oferta de serviços que agreguem valor aos negócios e desenvolvam a sociedade (SICOMÉRIO TRÊS RIOS, 2023). Tais atividades corroboram com a relevância de Três Rios à mesorregião, ampliando as oportunidades.

Para os transportes, o município de Três Rios é o segundo maior da região em registro de frota, com 38.521 veículos, aproximadamente, sendo 12% do Centro Fluminense (SENATRAN, 2023). Cerca de 86% dos veículos utilizam a gasolina e/ou o etanol como combustível, enquanto o diesel conta com uma participação de 5% na frota municipal. Em um estudo realizado por Soares *et al.* (2016), foi constatado que as áreas com um maior fluxo de veículos em Três Rios refletem a baixa qualidade do ar e altas concentrações de poluição atmosférica, o que requer a construção de políticas públicas e demais medidas que controlem e mitiguem a emissão de poluentes.

Em 2022, a prefeitura municipal de Três Rios sancionou a Lei N° 4.911, que dispõe sobre a realização de inventário de emissões de gases de efeito estufa gerados pela Câmara Municipal de Três Rios com vista à neutralização desses gases por intermédio dos planos de mitigação e de compensação correspondentes. Dentre as medidas contempladas pelo plano, destaca-se a utilização de meios alternativos de transporte não poluentes, quando possível (CÂMARA MUNICIPAL DE TRÊS RIOS, 2022). Embora tenha um enfoque nas atividades governamentais, percebe-se que há uma preocupação acerca da pauta dos transportes e os impactos ocasionados por estes ao meio ambiente.

Além de Três Rios, outro município a ser destacado é Nova Friburgo. Em 1890, a localidade foi elevada à categoria de cidade e, a partir de 1910, passou a ser polo industrial, e posteriormente

universitário, tendo também uma relevância significativa no turismo e produção agrícola (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017g). Por conta do clima, determinadas épocas do ano atraem uma quantidade expressiva de turistas para a região, ampliando a demanda por produtos e serviços com intensa movimentação na economia. Investimentos no setor de transportes também têm sido ampliados no município, a exemplo da unidade do SEST SENAT (Serviço Social do Transporte e o Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte), inaugurada em 2023, voltada à valorização dos transportadores autônomos e trabalhadores do ramo (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, 2023). Discute-se ainda a implantação de um distrito industrial em Nova Friburgo, com o intuito de atrair negócios e investidores para geração de mais empregos e renda (FIRJAN, 2023).

Nova Friburgo possui 189.937 residentes e densidade demográfica de 203,05 habitantes por quilômetro quadrado, o que representa um aumento de 4,33% em comparação com o censo de 2010, conforme aponta o IBGE (2023), conforme Figura 1.10.

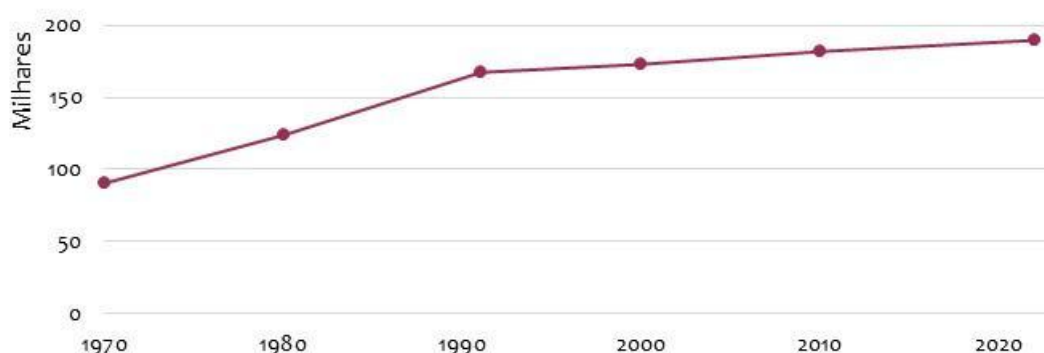


Figura 1.10. Crescimento populacional de Nova Friburgo. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

No transporte, o município possui grande participação na frota da região, totalizando 133.702 veículos emplacados. Toda a logística de transporte de cargas é feita a partir das estradas e caminhões da região (SENATRAN, 2023). Em 2023, a prefeitura de Nova Friburgo realizou uma consulta pública para avaliação da mobilidade urbana da cidade, de modo a reunir informações que contribuam para a elaboração de um plano de mobilidade do município (CHABOUDT, 2023). De 2020 a 2022, observou-se uma taxa de crescimento de, aproximadamente, 2,70% no número de automóveis dos municípios (SENATRAN, 2023). Dentre as possíveis justificativas para este incremento, pode-se pontuar a regulamentação do serviço de transporte remunerado privado individual de passageiros por meio de aplicativos, homologada em 2020 pela Câmara Municipal de Nova Friburgo (PORTAL DE LEGISLAÇÃO DO PODER LEGISLATIVO DE NOVA FRIBURGO, 2020). Com o regimento, amplia-se a aquisição de veículos e, por consequência, o número de viagens urbanas.

1.4. Baixadas Litorâneas

Como apresentado na Figura 1.11, as Baixadas Litorâneas são compostas por 10 (dez) municípios: Casimiro de Abreu, Rio das Ostras, Silva Jardim, Araruama, Armação dos Búzios, Arraial do Cabo, Cabo Frio, Iguaba Grande, São Pedro da Aldeia e Saquarema.

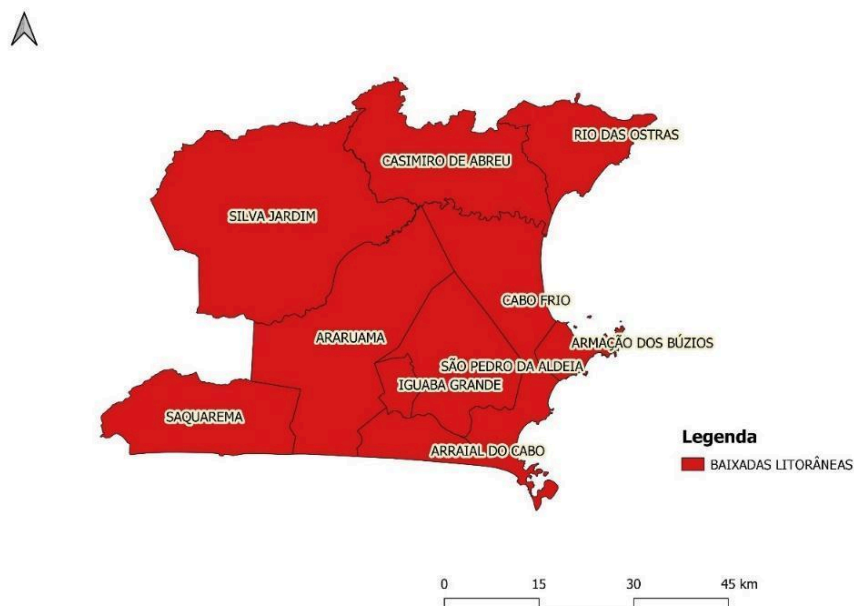


Figura 1.11. Mesorregião das Baixadas Litorâneas. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

A mesorregião das Baixadas Litorâneas é uma área geograficamente privilegiada, que impulsiona as atividades de turismo e lazer nos municípios litorâneos, principalmente em áreas costeiras, além de contar com uma economia diversificada – pesca, agricultura e comércio (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017c). Estas atividades são responsáveis por atrair uma alta demanda para a região, em especial em épocas de alta temporada, o que gera um número significativo de viagens e, por consequência, amplia os impactos viários observados.

Como exemplo da pluralidade das atividades nas Baixadas Litorâneas, tem-se o município de Araruama, cuja emancipação está ligada às funções portuárias e, atualmente, concentra um escopo voltado ao turismo e à indústria. O desenvolvimento urbano cresce em formato linear em direção ao município de Iguaba Grande, e é atendido por um conjunto de rodovias estaduais (RJ-106, RJ-124 e RJ-138), o que facilita o transporte de passageiros e o de mercadorias (TCE, 2016).

Araruama possui uma população de 129.669 indivíduos, conforme censo de 2022, e densidade demográfica de 203,16 habitante por quilômetro quadrado, representando um aumento de 15,54% em comparação a 2010 (IBGE, 2023) – ver Figura 1.12.

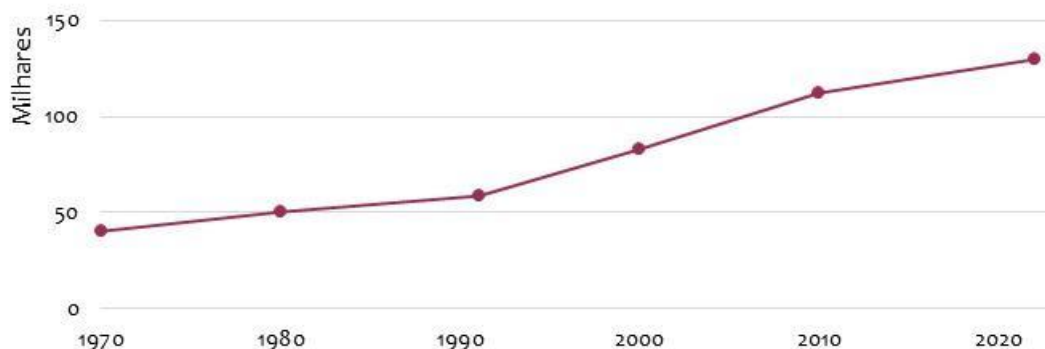


Figura 1.12. Crescimento populacional de Araruama. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

O crescimento da região deriva da oferta de empregos e abertura de novos empreendimentos, além dos investimentos em infraestrutura do setor público municipal (PREFEITURA MUNICIPAL

DE ARARUAMA, 2022). Este comportamento também pode ser observado no setor de transportes, que teve um aumento no número de veículos de, aproximadamente, 84,62% de 2010 a 2022 (SENATRAN, 2023). Tal percentual reflete, em resumo, os dados inerentes à automóveis e motocicletas. O crescimento urbano e de frota refletem a urgência para a conclusão do Plano Municipal de Mobilidade Urbana Sustentável, a fim de melhorar a mobilidade e a distribuição urbana de pessoas e cargas na cidade.

Cabe mencionar também o município de Cabo Frio, que é considerado um grande centro turístico na mesorregião. Esta cidade possui uma população de 221.987 habitantes, correspondendo a 26% do total das Baixadas Litorâneas, e densidade demográfica de 536,92 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2023). Comparado ao censo de 2010, o município apresenta um crescimento populacional de 19,18%, conforme indicado na Figura 1.13.

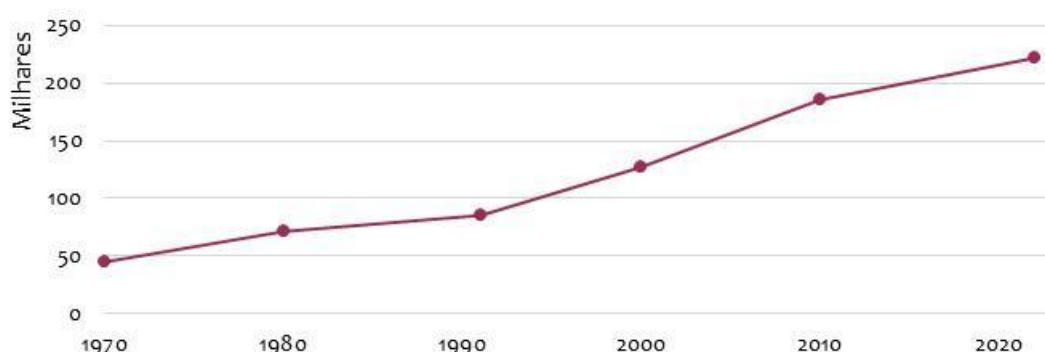


Figura 1.13. Crescimento populacional de Cabo Frio. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Além do turismo, devido à sua localização costeira, a pesca é uma atividade econômica tradicional em Cabo Frio que, associada à gastronomia da região, atrai diversas viagens durante o ano. Outra atividade de destaque está relacionada ao setor imobiliário que é ativo devido à demanda por propriedades de veraneio. Muitas pessoas investem em imóveis em Cabo Frio, impulsionando o desenvolvimento do setor.

Por dispor de um maior contingente populacional, o município de Cabo Frio também detém uma frota significativa 119.222 veículos, o que corresponde a 28% do total observado na mesorregião. Um ponto importante a ser destacado é que a quantidade de veículos que usam exclusivamente o diesel como combustível supera aqueles movidos somente a etanol (SENATRAN, 2023). Por apresentar uma localização estratégica, próximo a rodovias e demais destinos, o transporte de cargas, movido principalmente a diesel, desempenha um papel crucial na economia do município, apoiando diversas indústrias e contribuindo para o crescimento econômico da região.

1.5. Sul Fluminense

O Sul Fluminense é composto por 14 (quatorze) municípios: Barra Mansa, Itatiaia, Pinheiral, Piraí, Porto Real, Quatis, Resende, Rio Claro, Volta Redonda, Barra do Piraí, Rio das Flores, Valença, Angra dos Reis e Paraty – ver Figura 1.14.

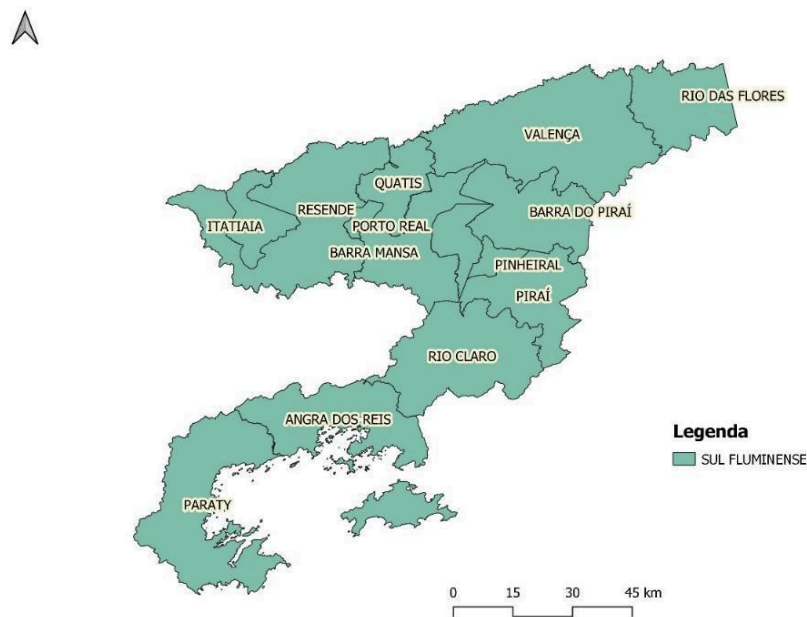


Figura 1.14. Mesorregião Sul Fluminense. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

Durante o século XX, o Sul Fluminense apresentou um significativo crescimento econômico e industrial. A instalação de indústrias, principalmente nas cidades de Volta Redonda e Barra Mansa, impulsionou a economia local, transformando a região em um importante polo industrial e metalúrgico do Brasil. Além do avanço na economia, a mesorregião se configura como um patrimônio histórico e arquitetônico significativo, o que movimenta o turismo e comércio local (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017a).

As principais vias de acesso à região são as rodovias BR-116, principal ligação entre os estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, e BR-393, que se inicia entre os municípios de Volta Redonda e Barra Mansa, estendendo-se até a Bahia (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017d).

De acordo com o IBGE (2023), o município de Barra Mansa chegou a uma população de 169.899 indivíduos no censo de 2022, o que representa uma queda de -3,98% em comparação com o censo de 2010 – ver Figura 1.15. Como o município está centrado em um setor específico, as atividades econômicas estão mais suscetíveis a variações, incluindo oscilações no número de residentes da cidade.

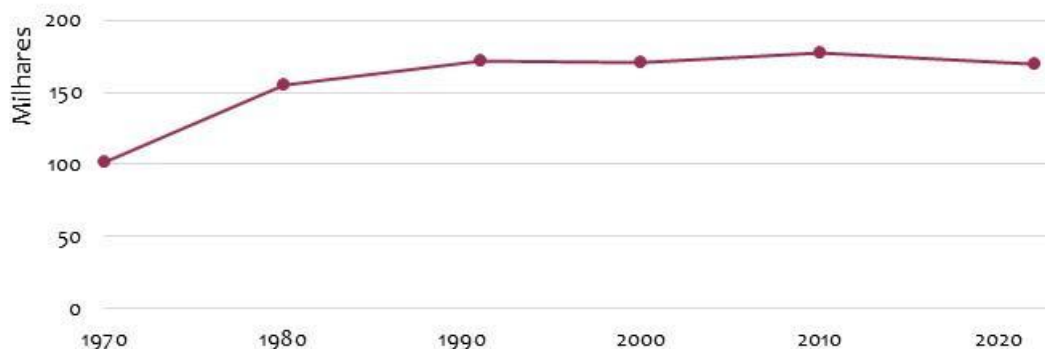


Figura 1.15. Crescimento populacional de Barra Mansa. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Em termos de transportes, de 2010 a 2022, houve um acréscimo de, aproximadamente, 72% na frota de veículos do município. Conforme aponta a Secretaria de Estado da Casa Civil do Rio de Janeiro (2017d), a influência da indústria automotiva na região pode estar contribuindo para o incremento da taxa de motorização, calculada em função dos carros de passeio existentes, podendo refletir ainda a situação socioeconômica dos habitantes.

Quanto à Volta Redonda, encontra-se instalada no município a Usina Presidente Vargas, uma das maiores siderúrgicas da América Latina e com capacidade anual de produção de 5,8 milhões de toneladas de aço (CSN, 2023). Embora haja forte presença da siderurgia, as atividades na cidade não se limitam ao ramo, diversificando-se nas áreas de indústrias químicas, de metalurgia, de alimentos e de serviços, o que contribui para a geração de empregos e oportunidades de negócios (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017d).

Volta Redonda possui 261.584 residentes, o que representa um aumento de 1,13% em comparação com o censo de 2010, conforme indica a Figura 1.16, e densidade populacional de 1.436,45 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2023). Esta concentração de habitantes se deve, em parte, à configuração histórica evolução do município em torno de indústrias de base (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017d).

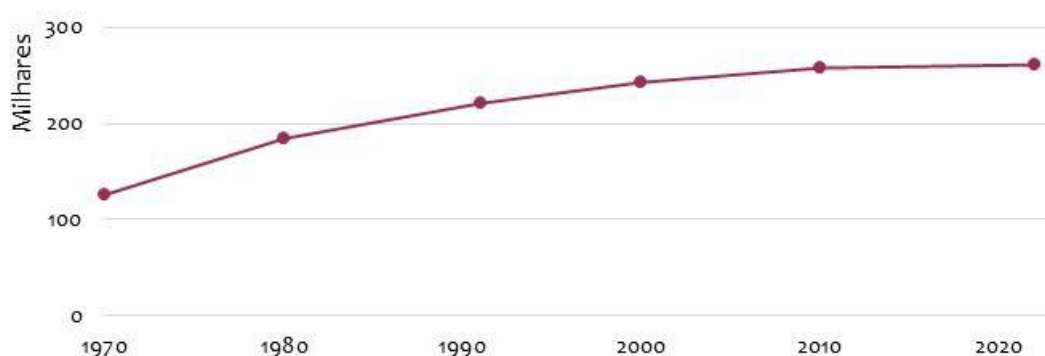


Figura 1.16. Crescimento populacional de Volta Redonda. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

No âmbito dos transportes, Volta Redonda apresenta 150.552 veículos, possuindo a maior frota da mesorregião. Por conta da intensa movimentação de cargas, nota-se que o consumo de diesel é superior ao etanol. Contudo, a gasolina segue como sendo o combustível mais utilizado (SENATRAN, 2023). Para amenizar os impactos provocados pelo transporte de cargas, em 2017, por meio do Decreto N° 14.453, restringiu-se o trânsito de veículos automotores pesados dentro da cidade (PREFEITURA MUNICIPAL DE VOLTA REDONDA, 2017). O intuito da normativa está em limitar a circulação de veículos que não estejam em rota para entrega de mercadorias, impedindo que estes trafeguem no município.

Angra dos Reis, também pertencente à mesorregião, possuindo uma influência significativa. O município é caracterizado principalmente por empreendimentos hoteleiros e atendimento ao mercado da construção naval e offshore de óleo e gás. De acordo com a Prefeitura Municipal De Angra dos Reis (2023b), o título de cidade foi alcançado em 1835, com marcos positivos na economia da região, como a exportação de produtos agrícolas. Posteriormente, no século XX, outros acontecimentos impulsionaram o desenvolvimento da cidade – a construção de um novo porto, a instalação do Estaleiro Verolme, a instalação da Usina Nuclear, a abertura da rodovia Rio-Santos e a construção da Petrobras.

Dados do censo de 2022 apontam que a população de Angra dos Reis é de 167.418 habitantes e a densidade demográfica de 205,82 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2023). Nota-se, a

partir da Figura 1.17, que houve uma queda de, aproximadamente, -1,23% na população da cidade, em comparação com o censo de 2010.

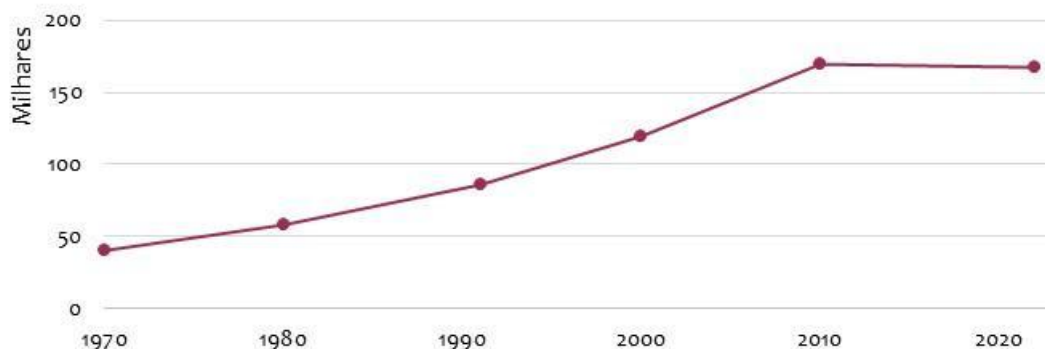


Figura 1.17. Crescimento populacional de Angra dos Reis. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Angra dos Reis é o quarto município da mesorregião em número de veículos emplacados (SENATRAN, 2023). Conforme aponta o Plano de Mobilidade Sustentável de Angra dos Reis, a implantação de atividades na cidade não é proporcional ao crescimento das localidades, sendo o centro a principal área de concentração de serviços, provocando a necessidade por deslocamentos diários pela rodovia que, por vezes, representa a principal ligação entre os bairros. Há uma priorização do transporte motorizado, reservando a ele a maior parte dos espaços da cidade (PREFEITURA MUNICIPAL DE ANGRA DOS REIS, 2023a).

1.6. Metropolitana do Rio de Janeiro

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro é composta por 30 (trinta) municípios: Engenheiro Paulo de Frontin, Mendes, Miguel Pereira, Paracambi, Paty do Alferes, Vassouras, Petrópolis, Teresópolis, São José do Vale do Rio Preto, Cachoeiras de Macacu, Rio Bonito, Itaguaí, Mangaratiba, Seropédica, Belford Roxo, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Queimados, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti e Tanguá. O mapa da mesorregião está indicado na Figura 1.18.

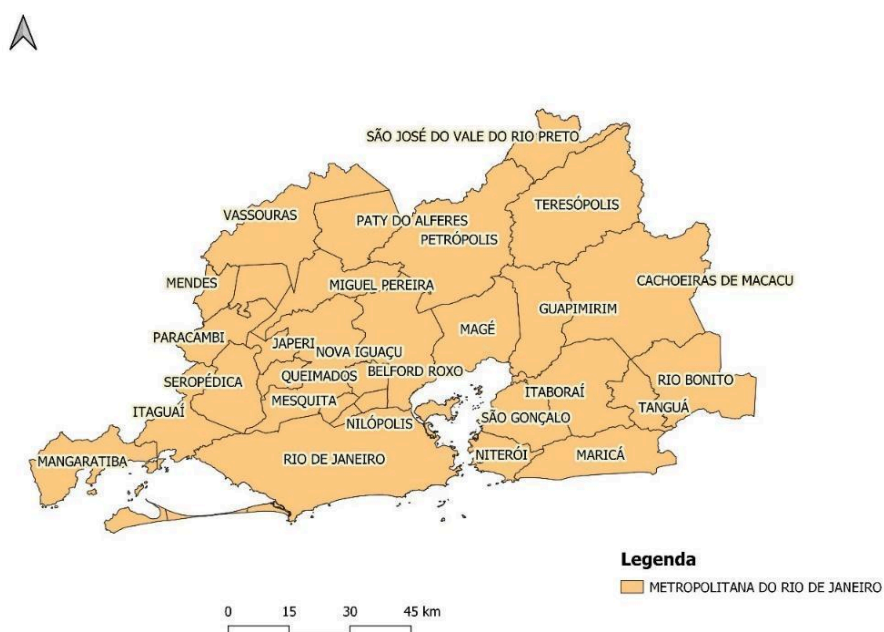


Figura 1.18. Mesorregião Metropolitana do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado da Fundação CEPERJ (2019).

O desenvolvimento da Região Metropolitana está diretamente associado ao crescimento da cidade do Rio de Janeiro e é considerada a mesorregião mais representativa do Estado no que tange aos aspectos populacionais e econômicos (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017e). De acordo com Summit Mobilidade (2022), uma região metropolitana pode ser conceituada como uma área de interligação física, política, cultural e econômica entre muitos municípios. Esta integração se dá a partir do transporte regular de pessoas e produtos.

Dos municípios pertencentes à Região Metropolitana, destaca-se a cidade de Duque de Caxias, que é a terceira mais populosa do Estado, atrás apenas da capital (Rio de Janeiro) e de São Gonçalo. O município conta com uma população de 808.152 habitantes e densidade demográfica de 1.729,34 habitantes por quilômetro quadrado, segundo dados do censo de 2022 (IBGE, 2023).

Por dispor de uma posição privilegiada, dada a proximidade com a Rodovia Washington Luiz (BR-040), o Arco Metropolitano do Rio de Janeiro (BR-493), a Linha Vermelha, a Linha Amarela, a Rodovia Presidente Dutra (BR-116) e a Avenida Brasil, o município atrai um significativo número de viagens, além de se caracterizar como um importante polo para indústrias e centros comerciais. Em Duque de Caxias também se encontra uma das maiores refinarias da Petrobrás (REDUC), principal responsável pelo processamento de gás natural do Brasil (PREFEITURA MUNICIPAL DE DUQUE DE CAXIAS, 2023).

Para o município de Itaguaí, destaca-se a ligação com a BR-493, que contorna a região metropolitana fluminense e faz a interseção com as importantes rodovias que ligam a metrópole carioca em diferentes direções, como São Paulo, Minas Gerais, Espírito Santo e demais regiões brasileiras (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017e). Conforme apontado por Regazzi (2021), Itaguaí possui uma diversificação econômica expressiva, aumentando significativamente a sua infraestrutura portuária, logística e industrial. Para atender à demanda por serviços, o município dispõe de institutos federais com cursos técnicos e profissionalizantes, especialmente voltado à indústria, com a formação de mão de obra qualificada (SECRETARIA DE ESTADO DA CASA CIVIL DO RIO DE JANEIRO, 2017e). O IBGE (2023) registrou no censo de 2022 que a população de Itaguaí é de 116.841 habitantes. Por conta da proximidade com as oportunidades de emprego, muitos indivíduos optam por migrar para a cidade a fim de se instalarem próximo aos locais de trabalho, o que justifica o aumento populacional de 2,77% em comparação com o censo de 2010, como indicado na Figura 1.19.

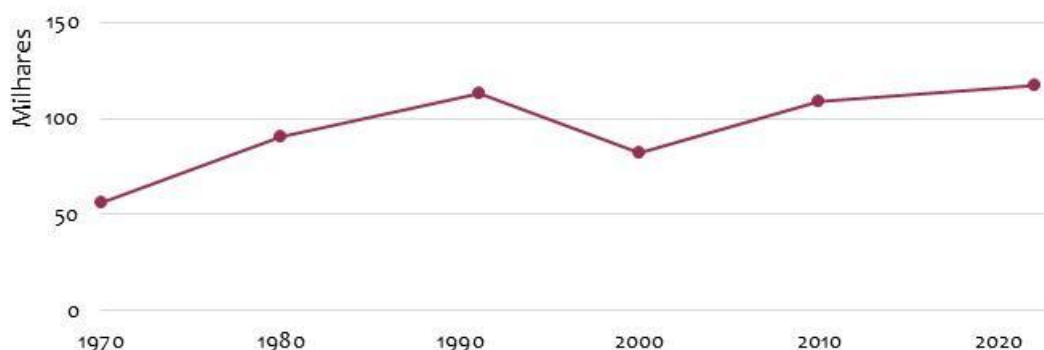


Figura 1.19. Crescimento populacional de Itaguaí. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

O município de Nova Iguaçu, por sua vez, é o quarto mais populoso do Estado, com 785.882 habitantes, e o maior da Baixada Fluminense em extensão territorial (PREFEITURA MUNICIPAL

DE NOVA IGUAÇU, 2023). Em critérios econômicos, sua relevância pode ser observada a partir da instalação de grandes empresas, como as Indústrias Granfino, do ramo de alimentos, a Cimobras, do ramo siderúrgico, e a Niely, a Embelleze e a Aroma do Campo, do ramo de cosméticos. Também há centros de ensino e pesquisa, que contribuem para o desenvolvimento e dinamicidade da região.

Por fim, destaca-se aqui o município do Rio de Janeiro, que possui uma população de 6.211.423 pessoas e densidade demográfica de 5.174,77 habitantes por quilômetro quadrado, conforme dados do último censo realizado (IBGE, 2023). Houve uma queda de, aproximadamente, -2% no crescimento populacional, comparado aos dados do censo de 2010 (Figura 1.20). De acordo com especialistas, a redução no número de habitantes da cidade está relacionada à falta de avanço econômico e de segurança. Comparativamente a outras centralidades, o Rio de Janeiro apresenta uma queda no desempenho econômico, o que contribui para diminuição da procura de emprego e moradia na cidade (CUNHA, 2023).

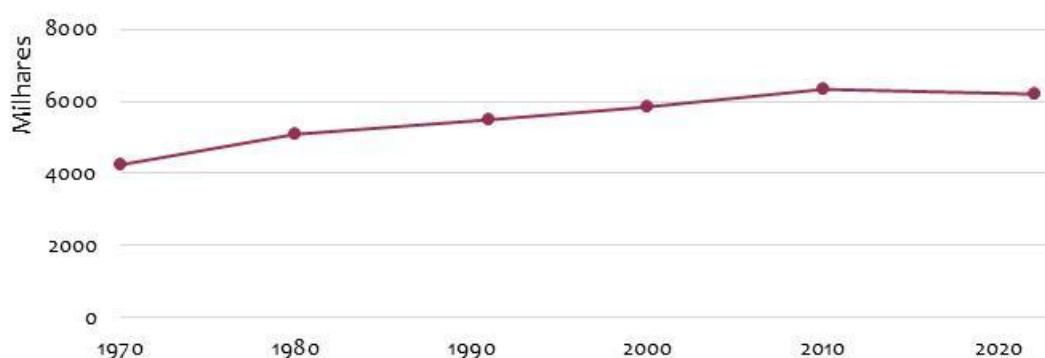


Figura 1.20. Crescimento populacional do Rio de Janeiro. Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

Por conta de suas condições geográficas e climáticas, o Rio de Janeiro possui elevada atratividade de turistas brasileiros e estrangeiros, sendo o turismo a principal atividade econômica realizada na cidade. Em concordância a esta relevância, o Ministério do Turismo em conjunto com empresários e demais partes interessadas têm discutido mecanismos para ampliação e desenvolvimento do setor, como a oferta de cursos que qualificam profissionais para atuação no ramo (BRASIL, 2023).

No âmbito dos transportes, tanto no de passageiros como no de cargas, o município do Rio de Janeiro possui mais da metade da frota da Região Metropolitana, liderando em todos os tipos de veículos. Em seguida, destaca-se o município de Duque de Caxias, que aparece em segundo lugar no número de caminhões, caminhonetes e ônibus, e em terceiro, Nova Iguaçu. Este comportamento deriva, principalmente, da concentração de indústrias nestas localidades, aumentando o número de viagens para o transporte de cargas. O percentual de veículos a diesel nas cidades do Rio de Janeiro e Nova Iguaçu é de 5%, enquanto no município de Duque de Caxias esta taxa chega a 7%.

2. Emissões de CO₂ e eletrificação da frota como alternativa para redução das emissões

O acúmulo populacional em centros urbanos está cada vez mais acentuado, como indicado na Seção 1 deste documento. Na cidade é onde estão concentrados cerca de 64% do consumo de energia e, aproximadamente, 70% da emissão dos gases de efeito estufa (GEE) (EPE, 2022).

Os GEE, tais como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido nitroso (NO₂) e clorofluorcarbonos (CFCs), geram retenção de calor e tornam o planeta mais quente. O principal responsável pelo efeito estufa, com contribuição de aproximadamente 60% é o dióxido de carbono, originado da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral, gás natural etc.), queimadas e desmatamentos. Tais ações, além de gerarem o CO₂, eliminam agentes naturais de absorção do composto químico do ar durante a realização de fotossíntese (CETESB, 2022). Pode-se afirmar então que as atividades humanas têm contribuído nos últimos anos de forma intensa com a geração de GEE, sendo as principais atividades relacionadas à queima de combustíveis fósseis, para geração de energia (termelétricas) e aquecimento, e ao setor de transportes, que é responsável por um quarto das emissões de GEEs no mundo, sendo o que mais gera irradiações de carbono desde 2000 (AGÊNCIA BRASIL, 2018).

Em 2019, o setor de energia foi responsável por, aproximadamente, 19% do total de emissões no Brasil, contribuindo com 413,7 milhões de toneladas de CO₂e¹. Neste campo, os transportes representam cerca de 47% da emissão de CO₂e, contribuindo com 196,5 milhões de toneladas de CO₂e (SEEG, 2020). Essa contribuição expressiva da área de transportes deriva do uso de combustíveis fósseis em veículos automotores de carga ou passageiros. Dados mostram que, neste mesmo ano, caminhões e automóveis foram as fontes responsáveis por 40% e 31% das emissões, respectivamente.

Em 2020, com a expressiva redução no uso de combustíveis no transporte de passageiros devido à pandemia de Covid-19, o setor de transportes exibiu uma diminuição em emissões da ordem de 11,1 milhões de toneladas de CO₂e em relação ao ano de 2019. Contudo, por conta do transporte de cargas, ainda houve um consumo de 40 bilhões de litros de óleo diesel mineral no modo rodoviário, o que contribuiu para 20,9% do total de emissões de CO₂ no Brasil e representou 91,4% do total de emissões do setor de transportes.

Para cada litro de diesel consumido por veículos pesados, há uma emissão de 2,65kg de CO₂ (LIGTERINK *et al.*, 2016). Outros combustíveis, por sua vez, apresentam um percentual de emissão mais ameno. Natural Resources Canada (2014) relata que motores à gasolina possuem uma emissão de 2,3kg de CO₂ por litro de gasolina consumida. Em um estudo da Embrapa Agrobiologia (EMBRAPA, 2009), avaliou-se um percurso de 100 quilômetros feito por um carro a

¹ Dióxido de carbono equivalente – medida utilizada para representar os demais gases com efeito de estufa GEE em forma de dióxido de carbono.

gasolina e movido a álcool. Considerando as emissões da produção do combustível e as emissões próprias da combustão no carro, foi constatado que um veículo movido a etanol de cana de açúcar é capaz reduzir em 73% as emissões de CO₂, comparado ao de gasolina pura. O CO₂ liberado na queima do etanol utilizado em veículos é compensado pelo CO₂ capturado quando as culturas utilizadas para produzir etanol são cultivadas. Sendo assim, os veículos que utilizam mistura de etanol de alta porcentagem produzem menos CO₂ do que veículos convencionais por quilômetro percorrido (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2023).

As emissões no contexto urbano dependem do modo e tipo de transporte empregado, sendo sua análise fundamental para estudos das emissões de GEE. A Tabela 2.1 fornece dados acerca da emissão por tipo de transporte e emissão por passageiro.

Tabela 2.1. Emissões de CO₂ no transporte urbano.

Tipo de transporte	Emissão de CO₂ (kg CO₂/km)	Emissão de CO₂ (kg CO₂/pass.km⁻¹)	Ocupação média veicular passageiros
Metrô	3,16	0,0035	900
Ônibus	1,28	0,016	80
Automóvel	0,19	0,1268	1,50
Motocicleta	0,07	0,0711	1,00
Veículos pesados	1,28	0,8533	1,50

Fonte: Adaptado de Carvalho (2011).

Nota-se, a partir da Tabela 2.1, que o automóvel e os veículos pesados são aqueles que possuem maior taxa de emissão de CO₂ por passageiro e extensão da viagem. Todavia, sua atuação em meio urbano ainda é expressiva, o que reflete a necessidade de observação de alguns aspectos:

- O estímulo ao uso de transportes públicos fornece uma redução significativa nas emissões quando comparado ao metrô e automóvel;
- Veículos pesados, responsáveis pela maior parte de emissão de CO₂ no setor de transporte, precisam de atenção de políticas de manutenção e renovação de frota, com tecnologias mais limpas;
- No contexto brasileiro, ainda é comum a existência de políticas que incentivam o uso de veículos individuais, a partir da redução de custos de automóveis e ampliação de créditos para compra; e
- O estímulo de viagens com veículos não poluentes, principalmente bicicletas, se mostra como alternativa para as cidades que possuem estrutura de ciclovias, ciclofaixas e ciclorrotas.

Percebe-se que a redução de emissões de GEE nas atividades de transportes é o maior desafio do setor, sendo a busca por alternativas aos combustíveis fósseis fundamental para este fim. Discussões acerca de soluções envolvem: eletrificação da frota; utilização de biocombustíveis; escolha por modos mais eficientes; captura e armazenamento de CO₂ a bordo; entre outros. Considerando a relevância dos veículos elétricos como contribuintes na redução de emissão de GEE, destaca-se nesta seção informações sobre essa alternativa.

2.1 Eletrificação da frota

Os veículos elétricos configuram uma alternativa para a redução da emissão de GEE, além de serem importantes contribuintes para redução na poluição sonora. Segundo dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE, 2023a), o Brasil registrou um aumento de 58% no emplacamento de eletrificados no semestre de 2023, quando comparado ao mesmo período do ano anterior. A frota total de veículos eletrificados, de porte leve, atingiu a marca de 158.678 unidades, desde janeiro de 2012 até junho de 2023. Com o constante aumento da frota de veículos elétricos leves, ocorre o crescimento da rede de eletropostos. No levantamento da ABVE, em agosto de 2023, havia 3.800 eletropostos públicos e semipúblicos no Brasil, contra 2.955 em dezembro de 2022, o que demonstra um crescimento de 28% (ABVE, 2023b).

Entretanto, ainda há uma barreira relacionada à capacidade de armazenamento das baterias, principalmente pela crescente demanda por maior autonomia dos veículos, condicionando o desenvolvimento do mercado. Como aspectos relevantes na evolução desses componentes, destaca-se: a diminuição do peso e tamanho da bateria; a ampliação da vida útil; a redução de preço; e a diminuição do tempo de recarga (MERCER e HESSE, 2019). Em geral, os veículos elétricos atuais são constituídos de baterias de Lítio-íon. A Tabela 2.2 fornece uma comparação de propriedades de baterias.

Tabela 2.2. Comparação de tecnologia de baterias.

Bateria	Tensão nominal (V)	Densidade de energia (Wh/kg)	Temp. de operação (°C)	Eficiência (%)	Vida cíclica (ciclos)	Vida projetada (anos)
Pb-ácida VRLA	2,0	25 a 50	-10 a 40	80 a 85	500 a 2000	10
Na/NiCl ₂	2,6	90 a 150	-30 a 60	82 a 91	+4500	+10
Lítio-íon	3,2 a 3,8	100 a 220	-25 a 45	90 a 95	+5000	+20
Fluxo Vanádio	1,4	10 a 20	10 a 40	60 a 74	+10000	10 a 15

Fonte: Adaptado de Rosolem (2018).

Baterias de Lítio-íon reúnem, atualmente, reúnem as melhores propriedades (ver Tabela 2.2) e possuem algumas vantagens: alta densidade de energia (ocupa pouco espaço); suporta elevados picos de corrente; possui excelente desempenho em aplicações de ciclagem; baixo tempo de recarga (1 a 3 h); e elevada eficiência de carga (ROSOLEM, 2018).

O tipo de carregamento de baterias de veículos elétricos é classificado de acordo com o tempo de recarga da bateria e a potência fornecida pelo eletroposto (ENERGISA-NDU-042, 2021). Em geral existem três tipos de recarga:

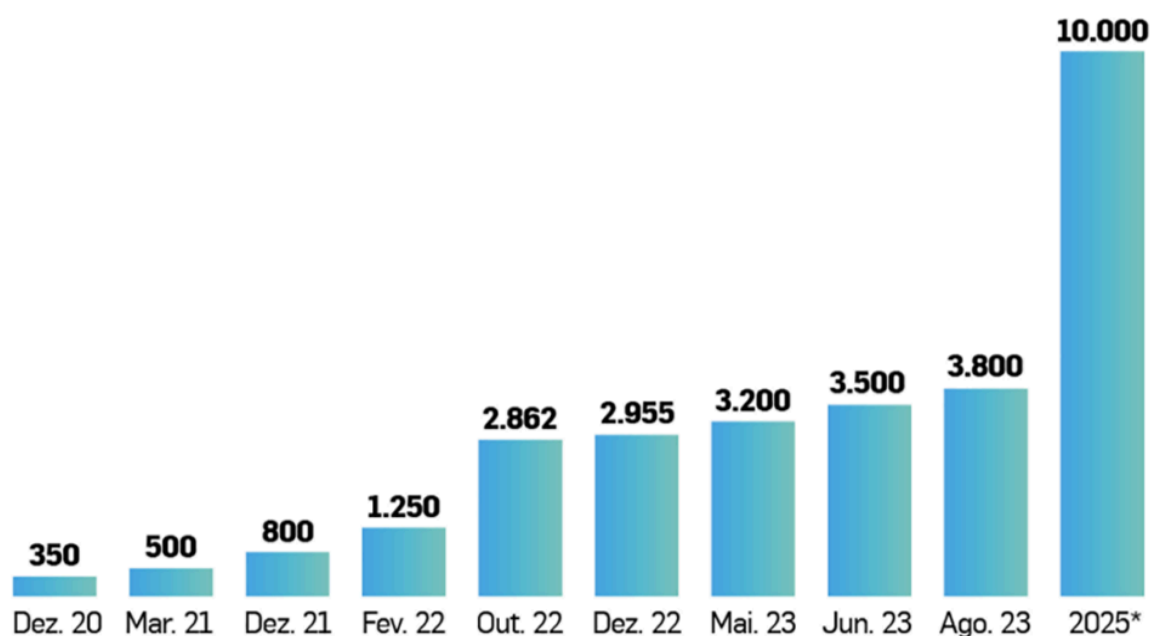
- Recarga lenta, recarga normal ou convencional: as baterias são recarregadas entre 6 e 8h, e a potência de recarga gira em torno de 7,0 kW. É recomendada para aplicação em residências e empresas, e geralmente estão associadas a eletropostos de Nível 1;
- Recarga semirrápida: possui tempo de recarga de 1 a 4 h e potência de recarga de 22 kW. É recomendada para utilização em espaços públicos, vias públicas e semipúblicas, centros comerciais, shopping centers e estacionamentos, e geralmente estão associadas a eletropostos de Nível 2; e

- Recarga rápida: realizado em estações com potência de recarga da ordem de 50 kW. O tempo de operação é de, aproximadamente, 30 minutos. Recomenda-se a aplicação em rodovias, pontos de táxi e pontos públicos em geral. Estão ainda associadas a eletropostos de Nível 3, que são trifásicos e fornecem de 50 a 150 kW de potência.

Segundo Rosolem (2018), para quaisquer tipos de estações de recarga, a velocidade de operação é bastante atenuada após alcançar 80% da carga. Logo, o carregamento das baterias Lítio-íon pode ser dividido em recarga rápida e recarga lenta, onde os primeiros 80% de recarga da bateria ocorre a uma corrente constante, e os 20% restantes têm uma corrente gradualmente menor. Por esse motivo, o tempo de recarga dos primeiros 80% são, praticamente, equivalentes ao tempo de recarga dos últimos 20%. Esse fato se deve aos processos químicos internos à própria bateria Lítio-íon, envolvendo seus eletrólitos (carga rápida) e eletrodos (carga lenta), e serve como proteção da bateria.

Na Noruega, único país onde a maior parte dos carros vendidos é de modelos 100% elétricos, uma das medidas adotadas para impulsionar a adesão está relacionada ao investimento em carregadores. Como consequência, há uma ampla disponibilidade de carregadores públicos rápidos, sendo estabelecido ainda o “direito ao carregamento”, que oferece recursos a associações habitacionais para instalação de pontos de recarga (WRI, 2023). Na China, a infraestrutura de carregamento também encorajou a adesão aos carros elétricos, que registrou o maior número de vendas em 2022 do que todo o resto do mundo. Experiências de diferentes nacionalidades mostram que a oferta de acesso a carregadores públicos, em conjunto com demais ações como políticas para tornar o preço dos elétricos competitivos no mercado, é essencial para a transição para uma mobilidade urbana mais limpa.

No Brasil, há uma crescente no número de eletropostos instalados, conforme mostra a Figura 2.1, fornecida pelo Grupo de Infraestrutura da ABVE/Tupinambá e publicada pelo Estadão Mobilidade (2023).



* Estimativa. Fonte: Grupo de Infraestrutura da ABVE/Tupinambá

Figura 2.1. Evolução da instalação de eletropostos no Brasil (2020-2025). Fonte: Mobilidade Estadão (2023a).

Observa-se que o significativo crescimento da instalação de eletropostos nos últimos anos está alinhado com os dados da ABVE, que apresentam o aumento da frota de veículos elétricos. Grande parte da infraestrutura, no entanto, está centrada nas regiões Sudeste e Sul do país (MOBILIDADE ESTADÃO, 2023b).

As ações de prefeituras, governos e entidades para promover a instalação de eletropostos em suas localidades apresentam-se como boas práticas de transição energética, a saber:

- Eletroposto em Poços de Caldas – Minas Gerais (MG): a Prefeitura, por meio do Departamento Municipal de Energia (DME), em conjunto com a PUC Minas e o IFSULDEMINAS, instalaram, em 2021, um eletroposto de recarga rápida, cuja energia é proveniente de placas fotovoltaicas, e com abastecimento gratuito (PREFEITURA DE POÇOS DE CALDAS, 2021). Tal ação promove a inclusão do município na rota de proprietários de veículos elétricos, reduzindo as emissões de CO₂ e movimentando outros setores: comércio, serviço e turismo;
- Eletropostos em shopping centers e supermercados: segundo Santos (2019), o tempo médio de permanência de um consumidor em shopping centers varia de 73 a 76 minutos (2012 e 2016), conforme dados da Associação Brasileira de Shopping Centers (ABRASCE). Com isso, a instalação de eletropostos nesses locais se mostra uma opção viável para ampliar a rede de pontos de recarga. O Estado do Rio de Janeiro, apresenta, segundo a ABRASCE (2023), 71 shopping centers em 2023.

O transporte de passageiros, especialmente no transporte público por ônibus, também tem avançado na eletrificação da frota, com veículos híbridos e elétricos a bateria (MAHMOUD *et al.* 2016). Segundo o Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR) e o Banco Mundial em seu Caderno Técnico de Referência para eletromobilidade nas cidades brasileiras – Volume I (BRASIL, 2022b), estima-se que, para se alcançar os benefícios de redução de emissões fornecidos por um único ônibus elétrico de 18 metros (articulado), que possui capacidade média de 160 passageiros, sejam necessários 100 veículos elétricos. A cada 1000 ônibus elétricos em circulação, são poupados 500 barris de diesel, por conseguinte, 1000 veículos elétricos a bateria evita, apenas, o uso de 15 barris de petróleo.

Em uma análise *tank-to-wheel*², outra contribuição, promovida pela substituição da frota de ônibus convencionais (a diesel) pelos ônibus elétricos é que, embora considerando a circulação na cidade do Rio de Janeiro, a autonomia do ônibus convencional e o ônibus elétrico seja da ordem de 250km por dia e, aproximadamente 7000 km por mês. O consumo por quilômetro é, em média, 2,62km/l e 0,68km/kWh, o que gera, além redução de emissão de poluentes, uma redução de custos de abastecimento quando se compara ao preço médio do litro do diesel e o custo do kWh (WILSON *et al.*, 2014). A Tabela 2.3 apresenta uma estimativa do custo mensal do abastecimento de ônibus convencional, com diesel S10, e ônibus elétrico.

Tabela 2.3. Estimativa de custo mensal com diesel S10 e energia elétrica.

Tipo de combustível	Mês referência	Custo unitário	Custo total
Diesel S10	out/2023	R\$ 6,06/litro	R\$ 16190,81
Eletricidade	set/2023	R\$ 0,81052/kWh	R\$ 8344,62

Fonte: ANP (2023) e Light (2023).

² Eficiência do uso de energia pelos próprios veículos.

Observa-se que, apesar da autonomia na ordem de 250 km/dia, tanto para o ônibus convencional quanto para o elétrico, é possível alcançar, aproximadamente, uma redução mensal de 48% no custo total de abastecimento.

Uma forma de contribuir com a economia de baixo carbono no transporte de passageiros de grande porte são os ônibus híbridos. Essa alternativa se apresenta como um vetor de transição ao reunir itens da tração convencional de ciclo térmico (em geral com motor diesel, no caso de ônibus, mas podem ser usados gasolina, gás natural, etanol, entre outros) e da tração elétrica (motor elétrico). Em comparação com os ônibus de tração convencional a diesel, os ônibus híbridos apresentam algumas vantagens. Além de uma melhor eficiência energética, a alternativa contribui para a redução das emissões de escapamentos e redução da produção de ruído. Além disso, em relação à redução de emissões, o veículo permite a utilização de combustíveis já existentes na matriz nacional, como o biodiesel, o que permite uma inserção gradual de veículos híbridos, enquanto não esteja implementada a infraestrutura necessária para veículos puramente elétricos à bateria (WORLD BANK, 2019). As principais desvantagens em relação aos ônibus convencionais são: custo elevado do veículo e sistema de manutenção mais complexo, além da implementação da infraestrutura de recarga.

Os ônibus elétricos a bateria ou de elétricos puros possuem um princípio de funcionamento bem simplificado. A energia elétrica, oriunda de alguma fonte externa, é acumulada na bateria. Quando a tração se faz necessária, a energia é fornecida pela bateria ao motor elétrico e o veículo inicia a operação (MAHMOUD *et al.*, 2016). As diferenças principais entre ônibus elétricos puros e os convencionais estão nos componentes de armazenamento de energia, sistema de frenagem e sistema propulsivo. Ao invés de reservatório de combustível, motor à combustão, sistema de câmbio e escapamento, os veículos a bateria possuem um sistema de acúmulo de energia, motor elétrico e conversores de potência. Os motores elétricos possuem, em geral, maior eficiência do que os motores tradicionais à combustão interna, o sistema de frenagem regenerativa recupera parte da energia que seria perdida por atrito na frenagem convencional (KARA, 2019).

No que tange à infraestrutura, os sistemas de recarga³ existentes para os ônibus elétricos e híbridos são de dois tipos: sistema de recarga condutiva e sistema de recarga indutiva (BRASIL, 2022). O primeiro consiste na operação de carregamento com o uso de conexão física entre o sistema de eletrificação e o veículo. Os métodos principais são: plug-in e pantógrafo. A recarga do tipo plug-in tradicional é o método mais utilizado, em que um cabo conector é conectado ao ponto de recarga e o tempo de recarga pode variar de 5 a 8 horas, para completar a carga total. Os pontos de recarga podem ser instalados nas garagens ou em pontos pré-determinados, como o fim e início das rotas; a potência média varia entre 25-150 kW. Já o sistema de recarga do tipo pantógrafo possui infraestrutura semelhante ao sistema de recarga dos trólebus, porém, para ônibus elétricos movidos à bateria, a estrutura de recarga é pontual, no qual o ônibus para sob ou ao lado da infraestrutura (dependendo da localização do banco de baterias no veículo, em geral se encontram no teto) e se conecta por meio de uma haste, comumente a estrutura de carregamento fica localizada em garagens ou pontos específicos localizados ao longo da rota. Estas baterias são menores do que aquelas utilizadas na recarga tipo plug-in tradicional, o que torna os veículos mais leves e espaçosos. A potência do carregador varia de 50-450 kW. Por meio do pantógrafo, a recarga é feita em poucos minutos e possibilita que a circulação dos veículos tenha elevada rotatividade.

No entanto, apesar do banco de baterias ser mais barato do que o de baterias de recarga do tipo *plug-in*, a instalação de infraestrutura de pantógrafos é mais cara. A recarga mais rápida pode

³ Sistemas que auxiliam na transmissão da energia da rede elétrica para o banco de baterias dos veículos.

ameaçar a autonomia e a vida útil do banco de baterias. A recarga indutiva, ou recarga de oportunidade, é baseada na recarga por meio de um campo eletromagnético sob o veículo (subterrâneo) para realizar a transferência de energia. Esta forma de carregamento possui custo e tempo de implementação mais elevados. A potência varia de 50 a 200 kW (BRASIL, 2022). A Tabela 2.4 apresenta características dos principais métodos de recarga de ônibus elétricos.

Tabela 2.4. Métodos de recarga de ônibus elétricos.

Métodos de recarga	Forma de transferência de energia	Tempo de recarga	Localização do ponto de recarga
<i>Plug-in</i>	Também conhecido como carregamento noturno. Método mais comum e acessível.	Lento. Necessita de 5 a 8 horas para atingir a carga total	No fim/início das rotas ou em garagens
Pantógrafo	Contato entre um pantógrafo e as hastes instaladas no teto do veículo	Rápido: de 5 a 20 minutos.	No fim/início das rotas; em garagens
Carregamento indutivo	Carregamento indutivo ou por oportunidade, usa o campo eletromagnético para transferir eletricidade	Rápido e dinâmico: de 20 minutos a 1 hora para atingir a carga total	No fim/início das rotas; ao longo das rotas ou em garagens

Fonte: Brasil (2022).

Segundo dados da Plataforma E-Bus Radar (2023), a frota total de veículos elétricos em setembro de 2023 era 394 veículos. Essa frota contribui para redução de 46,7 kt de CO₂ por ano. A Tabela 2.5 apresenta a distribuição de ônibus elétricos, por tipo, e sua contribuição na redução na emissão de CO₂, conforme alguns municípios brasileiros, em setembro de 2023.

Tabela 2.5. Municípios brasileiros com ônibus elétricos permanentes na frota e tipos de veículos (set/23).

Cidade Brasileira	Trólebus	Midi à bateria (8-11m)	Convencion al a bateria (12-15m)	Articulado a bateria (>18m)	Emissões de CO ₂ evitadas por ano (kt)	Frota total
Bauru	0	0	2	0	0.23	240
Brasília	0	0	6	0	0.73	2828
Diadema	0	0	6	0	NA	NA
Guarujá	0	0	4	0	NA	NA
Maringá	0	1	2	0	0.3	272
Mauá	0	0	2	0	0.23	NA
Salvador	0	0	8	0	0.88	2423
Salvador - Região Metropolitana	0	0	20	0	2.26	NA
Santos	6	1	0	0	0.76	NA
São Bernardo do Campo	0	1	0	0	NA	NA

Cidade Brasileira	Trólebus	Midi à bateria (8-11m)	Convencion al a bateria (12-15m)	Articulado a bateria (>18m)	Emissões de CO2 evitadas por ano (kt)	Frota total
São José dos Campos	0	0	0	12	2.01	NA
São Paulo	201	0	18	0	27.61	14378
São Paulo - Região Metropolitana	95	0	0	1	10.91	NA
Sorocaba	0	0	1	0	NA	371
Vitória - Região Metropolitana	0	0	4	0	NA	NA
Volta Redonda	0	0	3	0	0.34	163

Fonte: Plataforma E-Bus Radar (2023).

Nota-se, a partir da Tabela 2.5, uma grande concentração de ônibus elétricos na região Sudeste do Brasil, o que está de acordo com as informações fornecidas na Figura 2.1, acerca da distribuição dos eletropostos para veículos de pequeno porte.

Considerando que a implementação de veículos elétricos particulares e coletivos de transporte de passageiros possuem alternativas amplamente discutidas, a aplicação de veículos elétricos para fins comerciais ainda é limitada (GAO *et al.*, 2018). Sendo assim, outras possibilidades para redução de emissões precisam ser discutidas.

Quanto ao transporte de carga, como caminhões puramente elétricos, a empresa BYD fornece modelos eT18 21.250 e eT7 12.220 que possuem autonomia de, aproximadamente 165 km e 230 km, respectivamente, além de frenagem regenerativa e tempo de recarga de até 1h30min (eT18 21.250) e de 2 a 3 horas (eT7 12.220), em corrente contínua. Os veículos são equipados com a bateria de fosfato ferro-lítio (BYD, 2022).

O uso de veículos elétricos também pode contribuir para a economia de baixo carbono em serviços públicos, como na coleta de resíduos sólidos urbanos, que são pouco lembrados no que se refere à redução de emissão de GEE e, embora estejam presentes em pequena quantidade nas cidades, possuem significativa contribuição para emissão de poluentes (GÖHLICH e GRÄBENER, 2016).

Segundo o Ambiente Brasil (2011), os caminhões de coleta de resíduos sólidos são os veículos que mais emitem CO₂ por quilômetro rodado, aproximadamente, 1,24 kg de CO₂/km rodado e os que emitem menos são os veículos de emergência 0,3 kg de CO₂/km rodado, seguido de veículos de mineração, 0,34 kg de CO₂/km rodado. Uma possível justificativa para os veículos de coleta de lixo serem os que mais poluem é o fato de que, na operação comum deste tipo de veículos, quase não para na segunda marcha, o que potencializa o consumo de combustível e o caminhão realiza uma série de paradas para que o colaborador recolha o lixo nos pontos estabelecidos.

Barros (2021) ressalta em seu estudo que os veículos de coleta de resíduos são um caso particular dos veículos de carga, pois, além de propulsão necessitam de: energia para os levantadores; sistema de compactação de lixo, parte com maior consumo de energia, responsável por reduzir o volume do resíduo e, por conseguinte, amplificar a capacidade de transporte; iluminação de segurança e os demais sistemas. Na operação normal do veículo, a condução é repleta de acelerações e desacelerações em curtos períodos, beneficiados pela frenagem regenerativa. A opção de carregamento para esse tipo de veículo é a instalação de carregadores em pontos

específicos e o aproveitamento dos intervalos para levantamento e compactação dos resíduos, para efetuar o carregamento, tecnologia CoS – *Charge-On-the-Stop* (SILVA e PIZZOLATO, 2022).

Em síntese, a mobilidade elétrica como mecanismo preferencial de deslocamento (no transporte de passageiros e de carga) somente é possível com um conjunto de medidas, como rede de carregamento pública, maior autonomia dos veículos e criação de leis e de programas de iniciativa pública e privada de incentivo a esta transição (EDP, 2022).

2.2 Congestionamentos e velocidade

A desaceleração do tráfego e a redução de velocidade, seja por limitações regulamentares ou congestionamentos, implica diretamente no aumento do tempo de deslocamento de veículos. À medida que os automóveis operam em velocidades mais baixas, seus motores consomem combustível de maneira menos eficiente. Esse fenômeno é particularmente perceptível em veículos movidos a combustíveis fósseis, nos quais a eficiência energética diminui consideravelmente em baixas velocidades. Esse assunto sempre está em dissonância em relação à segurança da via, e por isso, deve-se conjugar a eficiência na queima de combustíveis, assim como a velocidade segura, pois ambos os casos, e de maneira antagônica, o objetivo é a população.

Os congestionamentos frequentes e a necessidade de manter os veículos em marcha lenta contribuem para uma elevada taxa de consumo de combustível. Nesse contexto, os motores operam em condições não ótimas, resultando em uma maior liberação de dióxido de carbono na atmosfera. Além disso, períodos prolongados de inatividade do motor durante congestionamentos levam a arranques frequentes, o que, por sua vez, consome mais combustível e intensifica as emissões (MADIREDDY et al., 2011; KEUKEN et al., 2010; PANIS et al., 2006).

A eficiência energética dos veículos é fortemente influenciada pela velocidade de deslocamento. Em velocidades mais baixas, ocorre uma queda substancial na eficiência do motor, resultando em um aumento proporcional nas emissões de CO₂ por unidade de distância percorrida. Portanto, ao analisar a relação entre a velocidade do tráfego e as emissões de carbono, torna-se evidente que a redução da velocidade está diretamente associada a uma pegada de carbono mais significativa.

Durante a pandemia COVID-19, o aumento da velocidade dos ônibus na cidade de São Paulo, reduziu as emissões de CO₂ em 52%, material particulado em 51% e óxido de nitrogênio em 56% (IEMA, 2020).

3. Importância da renovação da frota: tempo de uso do motor

Existe uma forte relação das emissões de gases do efeito estufa por veículos relacionadas ao acionamento do motor por combustão interna. De forma simplificada, é possível relacionar a queima do diesel com o volume de gases emitidos. A autonomia dos veículos de transporte é um fator diretamente ligado ao nível de emissões, pois o tempo de uso do veículo irá resultar numa quantidade de emissões de gases do efeito estufa e de partículas no mínimo proporcional ao consumo de um motor por km rodado. Isso faz com que a melhora da autonomia e economia sejam um fator chave para legisladores, fabricantes de veículos e consumidores. Além do consumo, outros fatores que estão diretamente e indiretamente ligados ao tempo de uso irão influenciar no aumento das emissões (PATANKAR *et al.*, 2021). O uso em serviço de um veículo, desde sua fabricação até sucateamento, resulta na redução natural de sua vida útil, como desgaste do motor e de outros equipamentos relacionados, folgas devido à montagem e desmontagem para a manutenção, perda de eficiência do catalisador, prolongamento excessivo da vida útil do veículo. As tendências de uso da população brasileira também resultam indiretamente no aumento de emissões. Dados de veículos cadastrados por ano, da Secretaria Nacional de Trânsito (SENATRAN), mostram que veículos com mais de 40 anos de fabricação ou mais de 200.000 km rodados ainda continuam circulando no território. O tempo de uso desses veículos é excessivamente prolongado, em relação a outros países da Europa e Estados Unidos da América (EUA). Além disso, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores - PROCONVE, que estabelece metas de redução de emissões e mudanças na tecnologia de veículos, traz a necessidade de renovação das frotas veiculares dos estados e municípios brasileiros. Veículos fabricados em anos anteriores ficam defasados em relação aos modelos do ano, não só devido à quilometragem acumulada, como a não adequação às novas fases de tecnologia para redução de emissões determinadas pelo PROCONVE (IBAMA 2011).

Essa relação entre tempo de uso e aumento das emissões destaca a importância de estratégias eficazes e do desenvolvimento de tecnologias que minimizem o impacto ambiental ao longo da vida útil do veículo. As montadoras devem atender a padrões de tecnologia menos poluentes, entretanto, estratégias de incentivos também podem impulsionar as vendas destes veículos. Além disso, as informações sobre o consumo de combustível e redução de emissões devem chegar ao consumidor, para a tomada de decisões mais conscientes sobre a compra e o uso de seus veículos.

Ao regular o consumo de combustível e o controle das emissões de gases de efeito estufa, os governos conseguem atuar em questões de segurança energética e ambientais. Associado a isso, devem surgir políticas públicas que possibilitem que os veículos antigos sejam substituídos por veículos mais econômicos e menos emissores, adequados às emissões estabelecidas no PROCONVE. Em resumo, a busca por maior autonomia e eficiência nos veículos de transporte traz uma necessidade, não apenas para otimizar os recursos econômicos, mas também como um imperativo ambiental. Ao compreender as complexas interconexões entre consumo de combustível, tempo de uso e emissões, é possível estabelecer estratégias abrangentes que abordem os desafios ambientais enquanto atendem às expectativas e demandas dos consumidores e da sociedade como um todo. O objetivo desta seção é analisar como o tempo de uso de motores à diesel pode influenciar no aumento de emissões e mostrar a necessidade de um incentivo à substituição de veículos antigos por modelos mais recentes.

3.1 Consumo de combustível e emissões

Embora haja movimentos em direção às energias renováveis, o uso de gasolina e diesel permanece elevado, de modo que eliminar o uso de combustíveis fósseis é um desafio. Sendo assim, a modificação dos motores, combustíveis e gases liberados pode melhorar o impacto ambiental das tecnologias e cumprir os regulamentos de emissões para o controle de poluentes, enquanto as energias verdes são desenvolvidas simultaneamente (FAYYAZBAKHS 2022).

No Brasil, o uso de combustíveis alternativos, como o biodiesel misturado ao diesel e o etanol puro e misturado à gasolina, apresentam boa redução de emissões. Entretanto, o uso de tais combustíveis ainda é dificultado por alguns desafios. O biodiesel, por exemplo, é mais corrosivo que o diesel, o que faz com que não possa ser implementado no Brasil em total substituição ao diesel. Caso fosse, os veículos mais antigos não iriam se adaptar ao combustível. A estratégia utilizada é diluir o biodiesel no diesel a cada ano em maiores quantidades de forma que as frotas possam ser renovadas aos poucos. Por isso, essa renovação deve ser incentivada (FAYYAZBAKHS 2022).

As tecnologias veiculares são grandes fatores para o consumo e economia de combustível, pois a variação das tecnologias aplicadas em motores também influencia nas emissões. Os avanços nas tecnologias automotivas apresentam saltos de tempos em tempos, que resultam em uma redução no consumo de combustível e consequentemente das emissões de gases do efeito estufa.

3.1.1 Fases do PROCONVE

O Brasil seguiu uma tendência de mudanças na motorização de veículos. No Brasil, desde 1989, estão determinadas metas de mudanças que devem ocorrer na tecnologia de veículos fabricados no Brasil, a fim de apresentar melhorias nas emissões, determinadas pelo PROCONVE, como visto na Figura 3.1. Nesse caso, as tecnologias já são existentes, mas ainda não aplicadas em todos os veículos fabricados (DAVISON, 2022).

PROCONVE – Veículos Pesados								
Requisitos	P1 - 1989	P2 - 1994	P3 - 1996	P4 - 2000	P5 - 2005	P6 - 2009	P7 - 2012	P8 - 2022
Limite emissão de fuligem								
Limite de gases poluentes		13 Pontos	13 Pontos	13 Pontos	ESC/ELR + ETC	ESC/ELR + ETC	ESC/ELR + ETC	WHSC + WHTC
Durabilidade de emissões		160.000 km	160.000 km	160.000 km	160.000 km	160.000 km	500.000 km	700.000 km
Limite de emissão de ruído								
Limite para Opacidade								
Limite para Material Particulado								
Sistema de pós tratamento*								
OBD – Diagnose a bordo								
Limite de número de partículas								
Limite para amônia								
RDE – Emissões em uso real								
ISC – Conformidade no uso								
Desligamento automático do motor								

Figura 3.1. Fases PROCONVE. Fonte: ANFAVEA (2020).

O primeiro grande salto tecnológico nos motores foi a substituição do carburador pela injeção eletrônica. O sistema de injeção eletrônica usa uma tecnologia mais avançada, controlada eletronicamente por um módulo central e tem a função de dosar a mistura ar/combustível dentro da câmara de combustão, fazendo com que o veículo tenha um menor consumo de combustível e o mínimo de emissão de poluentes, ao contrário do antigo carburador, que tem funcionamento mecânico.

Em 1995, o carburador foi substituído definitivamente pela injeção eletrônica, devido às maiores exigências governamentais a respeito de emissões poluentes. Em 1986, foi criada a P1, que corresponde à primeira fase do PROCONVE, que visava reduzir a emissão de poluentes a partir de um estudo da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Esta fase entrou em vigor em 1989, definindo parâmetros de controle de emissão de fumaça para caminhões e ônibus urbanos. Sua principal recomendação está diretamente ligada ao uso do carburador, pois recomenda a calibragem de sistemas de injeção de combustível, a fim de diminuir a emissão de óxido de nitrogênio (NOx).

Em 1994, foi criada a P2, a segunda fase do PROCONVE, visando reduzir o monóxido de carbono e a quantidade de enxofre no combustível, ao mesmo tempo surge na Europa o seu equivalente, o Euro 0. Outro objetivo da fase P2 é impor limites de ruídos decorrentes de veículos em aceleração. A fase também estabelece medidas mais claras de controle de inspeção dos veículos à diesel.

Dois anos depois a fase P3 foi criada, em 1996, para estabelecer medidas mais rígidas sobre a emissão de enxofre. Assim, as montadoras tiveram que se adaptar às mudanças, como na implantação de bombas injetoras de alta pressão, que otimizaram o sistema de injeção, garantindo uma melhor pulverização do diesel dentro da câmara de combustão, o que resulta em uma maior queima, reduzindo as emissões de poluentes, incluindo o enxofre. Além disso, a tecnologia de combustíveis acompanhou estas mudanças com o surgimento de combustíveis com menor teor de enxofre em sua composição. Na Europa começa a fase do Euro 1.

A fase P4, que ocorreu em paralelo ao EURO 2 nos anos 2000, teve como objetivo adequar 80% da frota de veículos às resoluções estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Entre as principais mudanças, estava a obrigatoriedade da aplicação de um conjunto de multiválvulas em motores de injeção. Nessa fase foi implementado o catalisador como parte integrante dos sistemas de exaustão dos veículos. O catalisador é um componente no sistema de escape do veículo que tem a capacidade de transformar gases produzidos na queima do diesel em produtos menos poluentes. Essa tecnologia contribuiu significativamente para a redução das

emissões de poluentes, como óxidos de nitrogênio (NOx) e monóxido de carbono (CO), promovendo assim uma grande melhoria na qualidade do ar.

Em 2006, a fase P5 permitiu que os veículos recebessem motores eletrônicos e com alta pressão na injeção de combustível, trabalhando na otimização dos combustíveis através de um acordo com as montadoras e refinarias. Dessa forma, os motores movidos a diesel passaram a ser fabricados com maior resistência ao efeito corrosivo do biodiesel e enquanto os motores passaram a ser produzidos com injetoras de alta pressão, as refinarias passaram a desenvolver insumos mais limpos reduzindo o teor de enxofre no combustível e o CO e NOx produzidos.

Na fase P6 houve um gargalo na compatibilidade de produção de diesel mais adequado, dessa forma o Brasil não foi capaz de atingir os limites estabelecidos pela legislação.

O P7 entrou em vigor em 2012, com o objetivo de reduzir em até 60% as emissões de óxidos de nitrogênio, além do uso ampliado da Arla 32. O reagente ARLA 32 é um fluido automotivo que atua nos sistemas de exaustão como agente redutor de até 98% das emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), transformando em vapor d'água e nitrogênio.

A fase P8 entrou em vigor em 2023, com os objetivos de estabelecer motores de tecnologia do mesmo padrão do Euro 6, estabelecendo limites de emissões mais rigorosos e obrigando as montadoras a comprovarem que estão dentro dos limites determinados. Nessa fase, o catalisador passa a ter o pré-requisito de vida útil de 160.000 km, o dobro do valor estipulado na fase P4, com vida útil de 80.000 km. Porém, com o decaimento do catalisador, o veículo passa a gerar mais emissões.

A deterioração dos veículos e as mudanças tecnológicas influenciam os fatores de emissão (FEs). A deterioração representada pela idade e quilometragem acumulada do veículo e alterações nos padrões de emissão influenciam marcadamente os fatores de emissão (ZHANG 2016).

3.1.2 Emissões de veículos a Diesel

As emissões de diesel são afetadas por fatores operacionais do motor (carga, velocidade, tempo de ignição e composições do combustível, especificamente a relação da taxa de átomos carbono/hidrogênio da cadeia) (WALLINGTON *et al.*, 2006). A compreensão das emissões de escape destes combustíveis requer uma visão abrangente tanto do combustível como do motor (FAYYAZBAKHSI 2022).

Nas últimas décadas, o número de veículos a diesel aumentou, a estrutura do tipo de veículo foi otimizada, a proporção de veículos com elevados padrões de emissões aumentou e as emissões absolutas de poluentes diminuíram. Entre estes, as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), partículas finas (PM_{2,5}), compostos orgânicos voláteis (COV) e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) de diferentes modelos veiculares foram reduzidos (Al *et al.*, 2022).

Os veículos modernos a gasolina e diesel estão equipados com sistemas de controle de emissões altamente eficazes que resultam em baixas emissões de poluentes como óxidos de nitrogênio (NOx) quando novos. Além disso, com a adoção de tecnologias de pós-tratamento cada vez mais complexas e sofisticadas, é importante garantir o seu desempenho eficaz ao longo da vida útil do veículo (DAVISON 2022).

Os efeitos das condições de condução e do comportamento do motorista têm grande influência na condução econômica de combustível dos veículos. A operação do motor a frio é conhecida por reduzir a economia de combustível. Indiretamente, o uso do ar-condicionado em temperaturas altas também pode reduzir a economia de combustível (CHEN 2016).

3.2 Degradação do Motor

O uso contínuo gera mudanças na estrutura dos motores. Existem muitos fatores que afetam as emissões dos veículos, tais como tipo de veículo, idade, quilometragem, padrões de emissão e inspeção e manutenção (I/M). As emissões mais elevadas dos veículos resultam de operação pesada, alta quilometragem e falta de manutenção adequada, resultando na deterioração do motor e do catalisador (LAU *et al.*, 2012).

Em curto prazo, muitas medidas podem ser tomadas a fim de mitigar ou até mesmo evitar de forma preventiva esses problemas. Entretanto, em longo prazo, mesmo realizando corretamente a manutenção, pode-se considerar um efeito de degradação desses equipamentos. Problemas como folgas, empeno, riscos, falta de lubrificação, falta de sincronia entre os equipamentos, número de montagens e desmontagens, decaimento do catalisador irão impactar diretamente na degradação dos motores e por consequência, em seu consumo (CHIANGGET *et al.*, 2008; LAU *et al.*, 2011, 2012).

Embora o esforço de atuação esteja voltado para a redução das emissões com tecnologia de controle de emissões aprimorada, de acordo com a fase PROCONVE, é imperativo quantificar a mudança nas emissões dos veículos ao longo de toda a sua vida útil, que no Brasil chega a exceder 40 anos. Sabe-se que, em uma média de 5 anos de uso, o catalisador tem uma queda na sua performance, inserindo um acréscimo as emissões já comuns ao veículo. Além disso, à medida que um veículo é conduzido, podem ocorrer alterações no comportamento das emissões devido ao desgaste dos motores, a deterioração dos sistemas de controle de emissões e as tecnologias de pós-tratamento, como catalisadores e filtros de partículas (DAVISON, 2022). Portanto, veículos de alta idade ou alta quilometragem apresentam deterioração significativa da eficiência catalítica, que está associada a emissões mais altas (BEYDOUN e GULDMANN, 2006; CHIANGGET *et al.*, 2008).

3.2.1 Fator de Degradação e aumento das emissões

A análise da relação entre degradação do motor e aumento das emissões é estudada por alguns órgãos como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). A idade, a quilometragem anual, as condições de manutenção e as mudanças na tecnologia do motor são alguns dos fatores que contribuem para a deterioração de um veículo. A degradação ao longo do tempo é um fenômeno complexo que pode ser afetado por muitos fatores. O tempo de uso do motor, juntamente com o acúmulo de quilometragem e a vida útil de componentes, pode fazer com que as peças e componentes do motor se desgastem com o tempo, o que afeta diretamente o desempenho e as emissões do veículo.

Sabe-se que as emissões observadas no escapamento são influenciadas, dentre outros fatores, pela idade do veículo, a quilometragem anual percorrida, as condições de manutenção e os padrões de condução do veículo. Os dados sobre os fatores de emissão em condições reais de uso no Brasil são limitados, devido a não medição dessas emissões na saída do escapamento.

O Inventário nacional de veículos do SENATRAN estabelece incrementos médios de emissões por acúmulo de rodagem, para automóveis usando gasolina C e etanol hidratado, baseados em dados do PROCONVE, mas não apresentam valores de deterioração para veículos do ciclo diesel devido à falta de dados ou estudos validados (CETESB, 2009). Para as análises do trabalho, foi utilizado o consumo segundo o inventário de vendas de diesel fornecido pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil (ANP), relacionado ao fator de emissão de CO₂ como

forma a estimar as emissões totais de veículos segundo seu ano de fabricação e o tempo de uso, em anos, que reflete na vida útil do veículo (ANP, 2023; MMA, 2011; MMA, 2013).

Dois parâmetros podem ser utilizados para estimar a influência da idade do veículo nas emissões produzidas. O primeiro fator é exatamente a quilometragem total de um veículo. Assume-se então que, conforme o veículo é utilizado e acumula quilometragem em seu odômetro, o veículo irá acumular um desgaste proporcional, sendo assim, o motor irá produzir emissões mais elevadas quanto maior for a quilometragem rodada (CETESB 2009).

O segundo fator é a mudança na tecnologia, observada pelo ano de fabricação do veículo e a fase PROCONVE relacionada ao ano analisado. A mudança tecnológica implica que os motores produzidos hoje são menos poluentes que os mais antigos, e cumprem requisitos de emissões mais rigorosos. Como existem poucos dados disponíveis para uma comparação de idade do mesmo veículo testado como novo e após certa quilometragem, a comparação da emissão esperada para certo modelo de veículo, de acordo com a fase PROCONVE, e emissão medida relacionada à quilometragem observada no odômetro, irá trazer um parâmetro que pode ser utilizado (CETESB, 2009; CLARK *et al.*, 2011).

A idade do veículo tem um efeito significativo nas emissões no que diz respeito à tecnologia do ano modelo específico em que o veículo foi fabricado. O estudo de Clark *et al.* (2011), apresentou a relação do ano de fabricação com a idade do veículo, em que veículos mais antigos apresentaram maiores emissões. A partir destes dados, foi observada a tendência de que a motores mais antigos tinham maior consumo e motores menos econômicos. Além disso, ao comparar veículos de anos diferentes e mesmo modelo de motor, observou-se que o motor de tecnologia mais recente apresentou emissões inferiores ao mais antigo (CLARK *et al.*, 2011).

Em outra análise sobre a deterioração de motores em relação ao tempo de uso, o documento europeu “*Report C 387 - Study on the durability of European passenger car emission control systems utilizing remote sensing data*” faz uma proposição para fatores de deterioração correlacionando com o nível EURO da tecnologia do veículo, que também pode ser correlacionada às fases de tecnologia do PROCONVE, conforme a Figura 3.1.

Tabela de referência entre as normas de emissões						
	1994-1995	1996-1999	2000-2006	2006-2009	2009-2011	2012-
Proconve (Brasil)	P-2	P-3	P-4	P-5	P-6	P-7
“Euro” (Europa)	“Euro 0”	“Euro 1”	“Euro 2”	“Euro 3”	“Euro 4”	“Euro 5”

*Não entrou em vigor

Figura 3.1. Correlação entre as normas de emissão PROCONVE e EURO. Fonte: ANFAVEA (2020).

O documento cita que, na realidade da Europa, veículos de carga com mais de 200.000 km já não são utilizados, entretanto, na realidade brasileira, os veículos ultrapassam essa quilometragem. A Figura 3.2 demonstra a variação dos fatores de emissão do NOx e CO.

LIMITES DAS EMISSÕES PARA VEÍCULOS PESADOS A DIESEL								
PROCONVE	EURO	CO (g/kW.h)	HC (g/kW.h)	NOx (g/kW.h)	MP (g/kW.h)	Norma (Conama)	Vigência	Teor de enxofre (S)
Fase P1	-	14,00 ¹	3,50 ¹	18,00 ¹	-	Res. 18/85	1989 a 1993	-
Fase P2	Euro 0	11,20	2,45	14,40	0,60 ¹	Res. 08/93	1994 a 1995	3.000 a 10.000 ppm
Fase P3	Euro 1	4,90	1,23	9,00	0,40 ou 0,70 ²	Res. 08/93	1996 a 1999	3.000 a 10.000 ppm
Fase P4	Euro 2	4,00	1,10	7,00	0,15	Res. 08/93	2000 a 2005	3.000 a 10.000 ppm
Fase P5	Euro 3	2,10	0,66	5,00	0,10 ou 0,13 ³	Res. 315/02	2006 a 2008	500 a 2.000 ppm
Fase P6 ⁴	Euro 4	1,50	0,46	3,50	0,02	Res. 315/02	2009 a 2012	50 ppm
Fase P7	Euro 5	1,50	0,46	2,00	0,02	Res. 403/08	a partir de 2012	10 ppm

CO	monóxido de carbono	HC	hidrocarbonetos	NOx	óxidos de nitrogênio	MP	material particulado	S	enxofre
----	---------------------	----	-----------------	-----	----------------------	----	----------------------	---	---------

1. Não foram exigidos legalmente.

2. 0,70 para motores até 85 kW e 0,40 para motores com mais de 85 kW.

3. Motores com cilindrada unitária inferior a 0,75 dm³ e rotação à potência nominal superior a 3.000 RPM.

4. Não entrou em vigor na data prevista.

Figura 3.2. Limites das emissões ao longo das fases PROCONVE para veículos diesel pesados.
Fonte: ANFAVEA (2020).

3.3 Fatores que influenciam no aumento das emissões

3.3.1 Problemas internos

As condições de condução e perfil de uso de um veículo dependem de fatores como estilos de condução, incluindo condução urbana e rodoviária, uso de ar-condicionado, partida a frio e estilos de condução agressivos, o percurso do veículo, a qualidade da estrada, a velocidade de condução, o motorista, o peso do veículo, o tipo de carga, entre outros fatores que variam de veículo para veículo. Estes fatores levam a vibrações, que podem gerar falhas, folgas e até mau funcionamento do veículo. Este desgaste do motor devido ao uso pode levar indiretamente a maiores emissões devido ao aumento no consumo do diesel para um mesmo percurso, como desgaste da bomba injetora, turbocompressor danificado, desgastes nos vedadores das válvulas, cabeçote com montagem incorreta, vazamentos nos anéis de vedação, falhas de combustão, projeção incorreta do pistão, dentre outros que levem ao mal funcionamento do motor.

3.3.2 Falta de manutenção adequada

Além do desgaste natural do veículo, a tendência da população brasileira é de adiar as manutenções programadas dos veículos e realizar manutenções corretivas. Dessa forma, as emissões poderão aumentar no período em que o veículo funciona em mau estado, até o momento em que ocorra a falha, de fato.

3.3.3 Falhas na bomba de combustível

Além de levar o líquido até o motor, as bombas de combustível equilibram o consumo de combustível e o deslocamento do motor. Como resultado, são essenciais para manter o sistema do veículo em equilíbrio. Existem várias possíveis falhas que podem comprometê-las, como queima de componentes, falhas no controle ou acúmulo de resíduos produzidos pelo combustível. Os problemas fazem com que o volume de combustível que chega aos motores seja alterado, o que resulta em um consumo excessivo de diesel.

3.3.4 Falta de sincronia entre as peças e sistemas

Os componentes dos motores de caminhões a diesel funcionam de forma sincronizada com os sistemas elétricos e mecânicos do veículo. Ao alterar esse sincronismo, o veículo pode funcionar mal e gastar mais combustível. Uma das circunstâncias mais comuns é o funcionamento das bombas de diesel e velas de ignição, que foram de sintonia, geram faísca e queima no tempo. Isso leva à perda de eficiência do motor, evidenciada como "engasgos", e baixas repentinas de desempenho.

3.4 Decaimento do catalisador

A tendência mundial do controle de emissões traz o desenvolvimento de legislações cada vez mais rigorosas para reduzir as principais emissões de poluentes atmosféricos dos veículos rodoviários. Isso resultou na utilização de tecnologias cada vez menos poluentes. A introdução e o refinamento de tecnologias como o catalisador de três vias, filtros de partículas e sistemas de redução catalítica seletiva (SCR) levaram a reduções consideráveis nas emissões de espécies como óxidos de nitrogênio (NOx) e material particulado (DAVISON 2022).

Existem muitos fatores que afetam as emissões dos veículos, como tipo de veículo, idade do veículo, quilometragem, padrão de condução e manutenção. O envelhecimento dos catalisadores resulta no acúmulo do efeito de redução do seu desempenho, normalmente descrito como desativação. Catalisadores com mecanismos de desativação idênticos, mas com históricos de exposição diferentes, serão desativados em graus diferentes. Com o passar do tempo de vida e uso do veículo, o catalisador perde a eficiência ao acumular desativação do catalisador à medida que os veículos aumentam a sua quilometragem e se aproximam de 150.000 milhas. O catalisador não tem um prazo de validade, mas uma garantia por parte dos fabricantes que pode ser de cinco anos ou 80.000 quilômetros, dependendo da marca. A partir da fase P8 do PROCONVE, os catalisadores deverão durar 160.000 quilômetros (AHARI, 2021).

3.5 Emissões devido às mudanças de tecnologia

Os fatores de emissão usados para calcular o nível de emissões diminuem à medida que os padrões de emissão se tornam mais rigorosos. Estes padrões dependem do perfil de uso indicando que os padrões de emissão de veículos são as principais ferramentas de política técnica disponíveis para mitigar as emissões dos veículos. Padrões de emissão (ZHANG, 2016).

A emissão de CO está relacionada à oxidação incompleta do diesel, devido a diversos efeitos. Um estudo realizado pelo CETESB, em 2019, mostrou que o fator de emissão de CO apresentou saltos significativos nos anos 2000, 2002, 2006, 2008 e 2012, o que pode ser relacionado às tecnologias das diferentes fases de requisitos do PROCONVE.

3.6 Emissões devido ao tempo de uso e *mileage*

A deterioração dos veículos e as mudanças tecnológicas afetam diretamente os fatores de emissão (FEs). Em estudos anteriores, foram utilizadas para avaliar os efeitos das milhas acumuladas nos fatores de emissão. A deterioração representada pela idade e quilometragem acumulada do veículo e alterações nos padrões de emissão influenciam marcadamente os fatores de emissão. A quilometragem é um parâmetro importante que indica o uso do veículo. Em geral, os fatores de emissão (FEs) aumentam linearmente com a quilometragem. Wang *et al.* (2013) relataram que os FEs de CO e NOx deterioraram-se com a idade do veículo (ZHANG, 2016). A deterioração das emissões é devido ao envelhecimento da frota do estado. Em seu estudo, Zhang

(2016) mostrou que, em geral, dos 3 aos 5 anos de idade do motor, alguns veículos começam a apresentar aumento das emissões; após 6 anos, a maioria dos veículos apresenta algum grau de deterioração, continuando com o aumento do tempo de uso do veículo.

3.7 Métodos de cálculo da variação das emissões devido ao tempo de uso do veículo

Para cálculo da variação das emissões devido ao tempo de uso do veículo, foram analisados estudos que apresentaram resultados para o aumento das emissões com o aumento de quilometragem, tempo de vida da frota, incremento nos fatores de emissão, aumento da deterioração dos motores.

Em seu estudo, Al *et al.* (2022), apresentou um método de cálculo para emissões de veículos a diesel, calculados a partir das emissões de poluentes do ar por veículos a diesel calculados com base em dados de registro, extensão de estradas e método do fator de emissão.

$$E_1 = \sum_i P_i * EF_i * VKT_i * 10^{-6} \quad (3.1)$$

Onde:

E_1 : é a emissão anual de poluentes correspondente à fonte de emissão do veículo i , em toneladas;
 EF_i : é o fator de emissão, que é a quantidade de poluentes emitidos por veículos a diesel do tipo i por quilômetro, em g/km;

P_i : é o número de veículos a diesel registrados; e

VKT_i : é a quilometragem média anual dos veículos a diesel do tipo i , em km/veículo (Ai 2022).

As emissões de veículos a diesel deteriorarão com a quilometragem do veículo, devido ao desgaste gradual do sistema de controle de emissões de escape e das peças do motor, além de manutenção inadequada ou mau funcionamento do motor. Em Hao (2022) na Figura 3.3, os resultados experimentais mostram que as emissões de CO, CO₂ e NO_x dos veículos a diesel aumentam com a quilometragem do veículo, mostrando a tendência de deterioração das emissões.

A massa específica de emissão de cada poluente i dentro da j -ésima janela pode ser calculada usando:

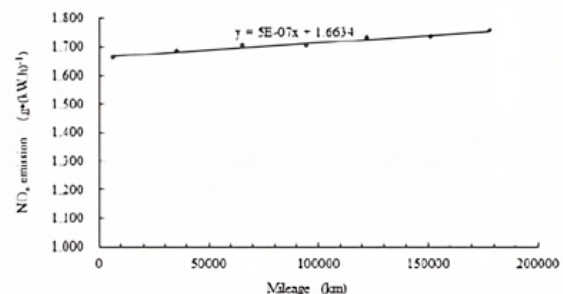
$$e_{wij} = \frac{m_{ij}}{W(t_{2j}) - W(t_{1j})} \quad (3.2)$$

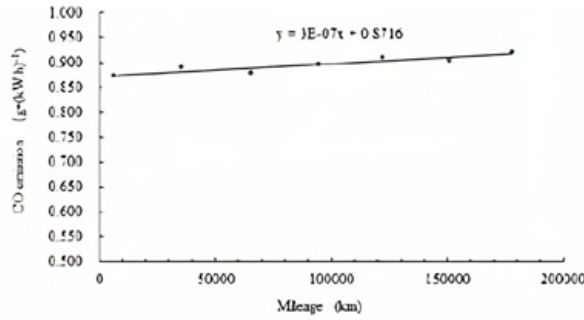
Onde:

e_{wij} : é a emissão específica de massa do poluente i por unidade de trabalho do motor dentro da j -ésima janela, em g(kW/h)⁻¹;

m_{ij} : é emissão total de massa de poluente i na j -ésima janela; e

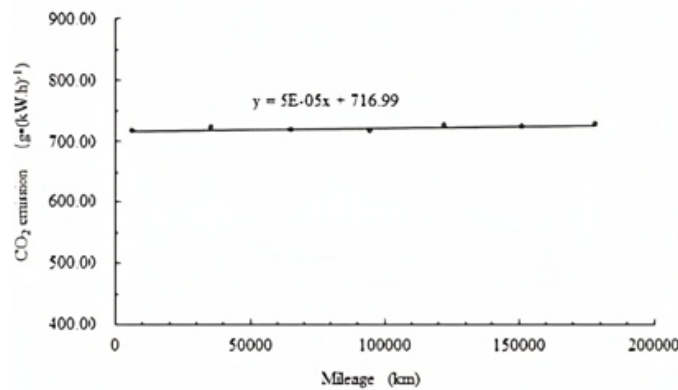
$W(t_{1,j})$ e $W(t_{2,j})$: são os trabalhos do motor produzidos do início para $t_{1,j}$ e $t_{2,j}$ respectivamente, em kW/h.





(a) CO emission

(b) NOx emission



(c) CO2 emission

Figura 3.3. Relação da quilometragem viajada e emissões de CO2. Fonte: Hao (2022).

Em outro estudo, Zachariadis (2001), considerou também modelos de renovação da frota, a sensibilidade à mudança de tecnologia e a taxa de sucateamento dos veículos antigos. O tempo de uso da frota de veículos é especialmente relevante em regiões em desenvolvimento do mundo, onde uma parte significativa da frota de veículos é composta por veículos usados, frequentemente mal mantidos, e importados de países desenvolvidos.

A função de vida útil de um tipo de veículo requer os parâmetros b (índice de falha para veículos) e t (tempo em anos) como variáveis de entrada. Zachariadis (2001) apresenta que a maneira mais confiável de estimar esses dois parâmetros seria derivar os valores, ajustando a função de vida útil aos dados de distribuição de idade de anos passados. No entanto, para muitos países, é difícil coletar tal informação. Dessa forma, o número de veículos recém-registrados a cada ano é um conjunto de dados útil, que pode ser utilizado para estudar a vida útil dos veículos.

A simulação das taxas de sobrevivência e descarte é realizada com o auxílio de uma função de Weibull modificada, de dois parâmetros, com a seguinte função de confiabilidade:

$$\phi_i(k) = \exp - k + b_i T_i^{b_i} \text{ and } \phi_i(0) \equiv 1 \quad (3.3)$$

Onde:

$\phi_i(k)$: é a probabilidade de presença de veículos do tipo i com idade k ;

k : é a idade dos veículos, expressa em anos;

b : é a inclinação da taxa de falha para veículos do tipo i ($b_i > 1$, ou seja, a taxa de falha aumenta com a idade); e

T : é a vida útil caracterizada para veículos do tipo i .

Após estabelecer uma distribuição inicial de idade, para cada ano consecutivo, o número total de veículos descartados no ano t é:

$$C_{si}(t) = \sum_{k=1}^n CC_i(t-1, k-1) \left(1 - \frac{\Phi_i(k)}{\Phi_i(k-1)}\right) \quad (3.4)$$

Onde:

$C_{si}(t)$ é o número de veículos do tipo i que foram descartados durante o ano t ;

$CC_i(t, k)$ é o número de veículos descartados com idade k no ano t ; e

$CC_i(t-1, k-1)$ é o número de veículos do tipo i e idade $k-1$ que existiam no ano anterior.

Ao combinar as relações acima com previsões do número total de veículos do tipo i por ano, é possível calcular o número de novos veículos entrando no mercado, seja para substituir os antigos ou devido a um aumento no total de veículos. Ao ter os primeiros registros ao longo de um período significativo (10 anos ou mais), é possível prever os primeiros registros com o cálculo de $C_{si}(t)$ e selecionar os valores de b e t que melhor se ajustam aos dados reais; esses valores serão então usados para os anos futuros.

Zachariadis (2001), demonstrou em sua análise a sensibilidade do sistema a mudanças tecnológicas. Uma vez que o comportamento de emissões é principalmente impulsionado pela tecnologia, a distribuição de idade dos veículos é transformada em uma distribuição tecnológica, com o auxílio de matrizes apropriadas, que consideram a evolução da legislação nacional e internacional de emissões, definindo assim “tecnologias” como grupos de anos-modelo para os quais o mesmo padrão de emissão é aplicado.

Ao focar a análise em um tipo específico de veículo, considerando a sua tecnologia, e assumindo que tanto a quilometragem por veículo quanto o fator de emissão de uma determinada tecnologia são independentes da idade do veículo e, portanto, independentes do tempo. Assim, a sensibilidade à tecnologia é uma função da idade média da frota veicular, que depende da função do tempo de vida total da frota.

A função de vida útil avalia o número de veículos que permanecerão no mercado no próximo ano, mas não fornece informações sobre o número de veículos recém-registrados no ano. Em mercados automotivos em expansão, a participação de carros novos, ou seja, relação entre veículos novos e veículos antigos, será comparativamente alta, reduzindo assim a idade média da frota, em comparação com um mercado com a mesma função de vida útil e menor venda de veículos novos. Por outro lado, em mercados próximos à saturação, a venda de veículos novos representará, de forma aproximada, apenas substituições de carros descartados. Nesse caso, a idade média da frota será comparativamente mais alta.

A taxa de mudança nas emissões é inversamente proporcional à idade média da frota: um valor pequeno para a idade média leva a mudanças rápidas na relação calculada das emissões com o modelo e grau tecnológico do veículo, já que uma frota com idade mais baixa apresentará veículos com tecnologias de motorização mais modernas. Portanto, as medidas técnicas terão um efeito maior em taxas de renovação elevadas; no entanto, a magnitude e rapidez exatas dessas mudanças são questões mais complexas que requerem uma análise quantitativa.

Esses estudos têm demonstrado as possibilidades do modelo na avaliação do efeito de medidas específicas, como padrões de emissões mais rigorosos, incentivos para descarte de veículos ou

outras intervenções administrativas, em conjunto com características específicas da frota nacional, como a evolução das taxas de atividade e a dinâmica interna dos mercados nacionais.

3.8 Novas Tecnologias e Soluções Sustentáveis

Estudos de diversos países apresentam a mesma tendência de redução de emissões de gases e particulados, para alcançar os padrões de qualidade do ar e cumprir os limites de saúde recomendados pela Organização Mundial da Saúde (OMS) (Al et al., 2022). Mesmo assim, ainda há necessidade de se reforçar o controle da poluição atmosférica, especialmente no que diz respeito à redução contínua das emissões provenientes de fontes móveis de poluição (Al et al., 2022). Para reduzir as emissões poluentes dos veículos a diesel, muitos países atuaram na melhora dos padrões dos seus veículos, melhorando o nível de tecnologia e dos produtos petrolíferos, como no Brasil ao misturar biodiesel ao diesel. Alguns países como a China e Alemanha estão implementando políticas de subsídios para a eliminação de veículos antigos a diesel e substituição por veículos novos, com tecnologias mais recentes (Al et al., 2022).

Em especial, conforme já destacado no Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2014), existem significativas incertezas quanto aos fatores de emissão de escapamento. Por enquanto, esses dependem da durabilidade de sistemas catalíticos, condições de uso e condições de manutenção. Ademais, os fatores de emissão por desgaste de pneus, freio e pista também são objeto de estudo apenas recente no mundo. No Brasil, assim como em diversos países, essas emissões não são regulamentadas.

As regulamentações de emissões devem ser continuadas para a produção de veículos com tecnologias menos poluentes. Entretanto, para uma melhora efetiva dessas emissões, é preciso que os carros mais antigos sejam sucateados e trocados por veículos mais novos. Somente assim será possível levar a uma transição, aplicada na redução de emissões e menor impacto ambiental.

4. Processo metodológico

Os efeitos resultantes da poluição nas emissões de gases no setor de transporte contribuem para o aumento de doenças respiratórias em escala global. A liberação de substâncias prejudiciais ao meio ambiente e a aglomeração populacional nos grandes centros urbanos favorecem o surgimento de doenças associadas à utilização de combustíveis fósseis. De acordo com Glaeser e Kahn (2010), as emissões de CO₂ provenientes de veículos automotores são, em média, 50 vezes superiores às emissões per capita de um condutor de ônibus. A poluição atmosférica foi

responsável por 20 mil óbitos no Brasil e 1,15 milhão em escala global, representando aproximadamente 2% do total de mortes (WHO, 2009; ÖBERG *et al.*, 2011). No contexto brasileiro, a utilização de combustíveis derivados do petróleo para o transporte desempenha um papel significativo, pois emite 204 MtCO_{2e}, a parcela dedicada ao uso do diesel é 55% ou 112 MtCO_{2e} (FERREIRA *et al.*, 2017).

Neste trabalho, há um grande incentivo em relação ao consumo de biodiesel, pois as emissões de CO₂ são atenuadas com aumento da concentração no diesel comercial. O monitoramento da emissão de poluentes atmosféricos, atribuído ao PROCONVE, gradativamente, incentivou a adição de biodiesel ao diesel como forma de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, gases poluentes e material particulado. Esse processo ocorreu com a autorização do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE, 2019), a adição de 2% em 2005, 3% em 2008, 4% em 2009, 5% em 2010, 6% em 2014 e 7% em 2015, sabendo que no corrente ano, o volume obrigatório é de 12%, alcançando 14% em março de 2024 e para 15% em 2025 (CNPE, 2019 e 2023).

A principal vantagem do biodiesel reside na relação do balanço energético, que representa a quantidade total de energia gerada pelo biocombustível em comparação com a energia fóssil investida em sua produção (SOARES *et al.*, 2009). Conforme indicado por Macedo, Seabra e Silva (2008), Urquiaga, Alves e Boddey (2005), e Boddey (2008), a eficiência na aplicação da energia fóssil para a geração de energia pelo biocombustível é nove vezes maior. O biodiesel serve como um substituto para o diesel, uma vez que o carbono liberado durante a combustão é absorvido durante o crescimento das plantas que fornecem o óleo. Mora, Torres e Valero (2015), juntamente com Rajaeifar (2017), destacam que a adoção do biodiesel de óleo de cozinha usado (UCO) pode resultar numa redução de até 88% nas emissões de gases de efeito estufa, além de eliminar resíduos poluentes.

De acordo com Guo *et al.* (2016), a utilização de veículos elétricos híbridos (HEV) com treinamento em *Eco-driving* pode produzir resultados satisfatórios, especialmente quando combinada com o uso de *Global Positioning System* (GPS) e um Sistema de Informação Geográfica (GIS). No entanto, a adição de biodiesel apresenta algumas desvantagens, como baixa estabilidade à oxidação, alta viscosidade, menor eficiência térmica e aumento nas emissões de NO_x, conforme apontado por Devarajan, Munuswamy e Mahalingam (2017) e CNPE (2019).

O CO₂ está intrinsecamente ligado ao consumo de combustível, à distância viajada e ao desgaste do motor em veículos automotores. Essa interconexão é uma consequência direta do processo de combustão dos combustíveis fósseis, como a gasolina e o diesel, nos motores de combustão interna.

O consumo de combustível é um fator crucial na produção de CO₂ durante a operação de um veículo. Quanto mais combustível é queimado, mais dióxido de carbono é liberado na atmosfera como um subproduto do processo de combustão. A relação entre consumo de combustível e emissões de CO₂ é linear, o que significa que veículos que consomem mais combustível tendem a emitir uma quantidade proporcionalmente maior de CO₂.

A distância viajada também desempenha um papel significativo na quantidade total de CO₂ liberado. Quanto mais longo for o percurso percorrido por um veículo ou maior número de viagens para entregar uma carga, mais combustível será queimado e, conseqüentemente, mais CO₂ será emitido. Isso destaca a importância não apenas da eficiência de combustível dos veículos, mas também do modo como os motoristas utilizam seus veículos, esse método é chamado de *Ecodriving*. A escolha de rotas mais curtas, o uso de transporte público ou a adoção de práticas de direção mais eficientes, reduz significativamente as emissões na atmosfera.

O desgaste do motor é um aspecto muitas vezes subestimado, mas que também está relacionado às emissões de CO₂. Motores desgastados ou sem manutenção podem ter eficiência reduzida, o que significa que consomem mais combustível para gerar a mesma quantidade de energia. Além disso, o desgaste do motor pode levar a emissões mais altas de gases poluentes e de efeito estufa.

Para lidar com essas questões e reduzir a pegada de carbono dos veículos, muitos esforços têm sido direcionados para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes, como motores híbridos e elétricos, bem como a promoção de práticas de condução sustentáveis. Iniciativas para aumentar a conscientização sobre a importância de escolhas de transporte mais ecoeficientes e o desenvolvimento de fontes de energia mais limpas também desempenham um papel crucial na busca por soluções mais sustentáveis para o setor de transporte.

O tratamento de dados é explicado pela aplicação de métodos empíricos ou simulados para a apuração de resultados. Deve-se testar modelos de maneira a apurar o melhor resultado. Contudo, a sua aplicação pode ser explicada de acordo com características regionais, do mais complexo a mais simples aplicação. A revisão da literatura destaca o *GHG Protocol - Greenhouse Gas Protocol*, como o mais adequado pela sua simplicidade, baixo custo e rápida apuração dos resultados. Desta forma, é importante destacar os principais modelos de estimativa de CO₂, assim como de consumo de combustível.

4.1 Estimativa de Gases de Efeito Estufa – principais referências

a) Mobile

Método desenvolvido pela *US Environmental Protection Agency* (USEPA), sua última versão em 2001, baseada em fatores de emissão e velocidade média. O modelo pode ser utilizado para todos os modos e tipos de transporte com ênfase em transporte de carga. A Equação 4.1, destaca o modelo.

$$TEMF_{Categ.Veic} = \sum_{idade=1}^t [FV] * \left\{ \left[TE + DA + \frac{A}{C} \right] * [AT] * [AV] * [AC] \right\} \quad (4.1)$$

Onde:

TEMF: taxa de emissão da frota por categoria de veículo (g/milhas);

t: idade da frota (ano);

FV: fração de viagem por categoria de veículo;

TE: taxa de emissão (g/milhas);

DA: emissão devido à direção agressiva (g/milhas)

A/C: influência do ar-condicionado;

AT: fator de ajuste para temperatura;

AV: fator de ajuste para velocidade; e

AC: fator de ajuste para o combustível.

b) COPERT - Computer Programme to Calculator Emissions from Road Transport

O Método COPERT é mais adequado para mensurar as emissões por classe de veículos, tecnologia de motor, peso e velocidade (BOULTER e MCCRAE; 2007). Como esse modelo está agrupado em dados heterogêneos (agrupamento de dados específicos), torna-se mais adequada utilização de regressão para estimar o uso de combustível. A aplicação desse modelo é separada em três fontes: i) funcionamento do motor termicamente estabilizado (emissões quentes); ii) emissões de partida a frio; e iii) emissões por evaporação. A Equação 4.2 adequada para motor

quente e Equação 4.3 para velocidade média dos veículos. Ambas mais adequadas para o transporte rodoviário.

$$E_{quente} = N_j * M_j^k * e_{quente} \quad (4.2)$$

Onde:

E_{quente} : emissões do motor a quente (g);

N_j : número de veículos do tipo j;

M_j^k : distância percorrida por um veículo do tipo J em uma via do tipo k (km); e

e_{quente} : fator de emissão (g/km).

Para estimar a emissão, o COPERT também leva em consideração a velocidade média do veículo:

$$E_{quente} = \int \left[e(V) * f(V) \right] * dV \quad (4.3)$$

Onde:

V: velocidade do veículo em determinada via (rural, urbana, estrada etc) (km/h);

$e(V)$: relação de dependência entre a emissão e a velocidade do veículo; e

$f(V)$: distribuição de velocidades, que depende do tipo de via e do tipo de veículo.

c) IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

A metodologia IPCC é o método mais utilizado para mensurar as emissões de CO₂, e muito similar como padrão utilizada neste trabalho. Esse método tem o mesmo nome da organização científico-política criada em 1988 no âmbito das Nações Unidas (ONU) pela iniciativa do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e da Organização Meteorológica Mundial (OMM). O fator utilizado é referente no combustível queimado e são apresentadas nas Equações 4.4 e 4.5. Para verificar os níveis de atuação são apresentadas três formas (EGGLESTON *et al.*, 2006):

- **TIER 1:** utiliza os valores definidos pelo IPCC para os fatores de emissão a serem utilizados;
- **TIER 2:** utiliza valores nacionais para alcançar valores estaduais e municipais; e
- **TIER 3:** os níveis de emissão são calculados baseados de acordo com a classificação dos veículos.

Para **TIER 1:**

O cálculo da emissão de CO₂ é dado pela Equação 4.4:

$$Emiss\tilde{a}o_{CO_2} = \sum_a \left[Combust\tilde{a}vel_a * FE_a \right] \quad (4.4)$$

Onde:

a: tipo de veículo usado, podendo ser petróleo, diesel, entre outros;

$Combust\tilde{a}vel_a$: quantidade de combustível vendido (TJ);

FE_a : fator de emissão (kg/TJ); e

$Emiss\tilde{a}o_{CO_2}$: quantidade de CO₂ (kg).

O cálculo do TIER 1 e 2 são similares e podem ser utilizados para mensurar outros gases de efeito estufa, porém devem ser observado os fatores de cada gases, assim como o tipo de combustível.

Para TIER 3:

Utiliza-se valores de distância viajada de preferência para alcance mais preciso dos dados. O TIER 3 calcula os fatores de emissão em relação aos níveis de atividade do veículo relacionados por modos e tipos.

$$Emiss\tilde{a}o_{CH4\ ou\ N2O} = \sum_{a,b,c,d} [Combust\acute{i}vel_{a,b,c,d} * FE_{a,b,c,d}] + \sum_{a,b,c,d} C_{a,b,c,d} \quad (4.5)$$

Onde:

b: tipo de veículos usados;

c: tecnologia de controle de emissão (exemplo: uso de catalisadores);

d: condição de operação (tipo de via, temperatura etc.);

$Emiss\tilde{a}o_{CH4\ ou\ N2O}$: quantidade emitida de CH₄ ou N₂O (kg);

$Dist\acute{a}ncia_{a,b,c,d}$: percurso realizado pelo veículo com o motor aquecido e temperatura estabilizada (km);

$FE_{a,b,c,d}$: fator de emissão (kg/TJ); e

$C_{a,b,c,d}$: emissão durante a fase inicial da viagem, quando o motor está frio (kg).

d) MOVES – Motor Vehicle Emission Simulator

O método MOVES, assim como o método COPERT, pode ser utilizado em inventários nacionais. Contudo, esse método também é utilizado para emissão de alguns gases poluentes. Esse cálculo reflete o funcionamento do motor do veículo e sua atividade operacional, permitindo estimar as emissões diretas de GEE, partida frias e marchas lentas prolongadas. Recomendado para estimativas locais de emissões, demonstrados na Equação 4.6.

$$VSP_t = \frac{A*v_t + B*v_t^2 + C*v_t^3 + m*v_t*a_t}{m} \quad (4.6)$$

Onde:

VSP : potência específica do motor (kW/Mg);

A: resistência ao rolamento (kW.s/m);

B: resistência ao rotor (kW.s²/m²);

C: resistência ao ar (kW.s³/m³);

a_t : aceleração do veículo (m/s²)

v_t : velocidade média (m/s); e

m : tara do veículo (t).

A relação da potência específica do motor com as emissões de poluentes (g/h) também é considerada no modelo VSP.

e) GREET - Greenhouse gases, Regulation Emissions, and Energy use in Transportation

O método GREET é utilizado para mensurar as emissões do ciclo de vida completo (well-to-wheels). Esse modelo também pode ser utilizado para estimar o uso de energia em transporte. A diferenciação em relação aos outros métodos é a capacidade de estimar os poluentes como compostos orgânicos voláteis (VOCs) e monóxido de carbono (CO), assim como os gases de efeito estufa. Pode ser utilizado para vários modos de transporte, as principais variáveis são: i) intensidade energética (J/kg.m); ii) a necessidade de combustível para acionar o motor, e iii) o fator de emissão correspondente (ANL, 2013). A intensidade energética depende do tipo de motor que está relacionada com a carga transportada, dada pela Equação 4.7.

$$ie = \frac{ce}{Carga} \quad (4.7)$$

Onde:

ie: intensidade de energia (J/g):

ce: consumo de energia (J/km); e

Carga: carga transportada (g).

O consumo energético é determinado pela Equação 4.8.

$$ce = \frac{FA}{EC} \quad (4.8)$$

Onde:

FA: fator de aquecimento, que depende do tipo de combustível (J/l ou J/g);

EC: Economia do combustível (km/l ou km/g).

4.2 Estimativa de consumo de combustível e emissões de CO₂ – modelos mistos

f) *Artemis - Assessment and reliability of transport Emission Modelling and Inventory Systems*

O método Artemis foi desenvolvido e aplicado em 14 países diferentes, a principal diferença em relação aos outros métodos a verificação das emissões de forma instantânea de todos os modos de transporte. O principal objetivo foi: i) desenvolver uma metodologia para gerar relatórios nacionais; ii) gerar emissões em diversos cenários e avaliar os impactos; e iii) gerar dados de entrada para ferramentas que avaliam a qualidade do ar. O enfoque foi a quantidade de tráfego gerado por região. A Equação 4.9 exemplifica o modelo.

$$E_i = ei * T \quad (4.9)$$

Onde:

E_i: emissão total do gás;

i: tipo de gás;

e_i: fator de emissão do gás; e

T: atividade de tráfego, que no caso é o mesmo que a distância percorrida (km).

Esse método pode ser utilizado com exaustão a quente, partida fria e evaporação. O material particulado, e são estimados o material particulado através do desgaste dos pneus, pista, combustível e freios.

g) *EMFAC - Emission Factor*

O enfoque do modelo EMFAC é em função da velocidade média. Esse modelo é aplicado para viagens em velocidades constantes, pois conjuga ações de partida a frio, fases do motor quente e temperatura estabilizada. As Equações 4.10, 4.11 e 4.12 demonstram o modelo. As principais características desse modelo: velocidade média, diferentes temperaturas, tipo de combustível, umidade), e específico para veículos Leves.

$$Emiss_{em\ movim}_{cv} = DistTotal \times FracDist_{cv} * \left[\sum_{veloc=min}^{max} FraçãoDeVeloc_{veloc,cv} * FatorEmissão_{veloc,cv} \right] \quad (4.10)$$

$$FracçãoDEVeloc_{veloc,cv} = \frac{Distância_{veloc,cv}}{DistânciaTotal_{cv}} \quad (4.11)$$

$$FatorEmissão_{veloc,cv} = \frac{EmissãoPadrão_{veloc,cv}}{DistânciaPadrão_{cv}} \quad (4.12)$$

Onde:

DistTotal: distância total percorrida por veículo (milhas);

veloc: índice de faixa de velocidade;

cv: índice de categoria de veículo;

FracDist_{cv}: fração distância percorrida por categoria de veículos (*cv*);

FracçãoDEVeloc_{veloc,cv}: fração de velocidade por categoria de veículo (*cv*) e faixa de velocidade (*veloc*);

FatorEmissão_{veloc,cv}: fator de emissão por categoria de veículo (*cv*) e faixa de velocidade (*veloc*) (g/milhas);

Distância_{veloc,cv}: distância percorrida por veículo por categoria de veículo (*cv*) e faixa de velocidade (*veloc*) (milhas);

DistânciaTotal_{cv}: distância total percorrida por categoria de veículo (milhas);

EmissãoPadrão_{veloc,cv}: padrão de emissão por faixa de velocidade e categoria de veículo (g); e

DistPadrão_{cv}: distância padrão percorrida por categoria de veículo (milhas).

h) MEET - Methodologies for estimating air pollutant Emission from Transport

O MEET é orientado para verificar as emissões de veículos de carga, e foi aplicado na União Europeia, o objetivo era verificar as emissões de gases de efeito estufa e os materiais particulados emitidos por tonelada de carga (HICKMAN *et al.*, 1999). Semelhante ao ARTEMIS, esse método considera as emissões a quente, partida a frio e evaporação. Destacado na Equação 4.13.

$$E_{Total} = E_{quente} + E_{fria} + E_{evap} \quad (4.13)$$

As três variáveis são calculadas relacionando a velocidade média, variação da carga, inclinação da via etc. Para veículos a gasolina de porte leve até 3,5 toneladas, as emissões de CO₂ é calculada pela Equação 4.14.

$$E_{CO2} = 0,0621 * V^2 - 9,8381 * V + 601,2 \quad (4.14)$$

Para veículos de carga pesada é demonstrada na Equação 4.15.

$$E_{CO2} = K + a * V + b * V^2 + c * V^3 + \frac{d}{V} + \frac{e}{V^2} + \frac{f}{V^3} \quad (4.15)$$

Onde:

K: constante da função; e

e, f, a, b, c, d: coeficiente de funções.

Segundo Hickman *et al.* (1999), dependendo do veículo, fatores de correção serão necessários para ajustar o modelo, a fim de corrigir a inclinação da via, carga transportada, distância percorrida e temperatura ambiente.

O fator de correção para distância percorrida é dado pela Equação 4.16:

$$MC = a + b * V + c * m + d * V * m \quad (4.16)$$

Onde:

MC: fator de correção para considerar a distância percorrida; e
m: distância percorrida pelo veículo (milhas).

O fator de correção para considerar a temperatura ambiente é dado pela Equação 4.17:

$$TC = A * temperatura(C) + B \quad (4.17)$$

Onde:

TC: fator de correção para considerar a temperatura ambiente;
A e B: correção que variam de acordo com o perfil da velocidade); e
temperatura (C): temperatura ambiente (graus Celsius).

O fator de correção para considerar a carga transportada é dado pela Equação 4.18:

$$LC = k * n * \gamma + p * \gamma^2 + q * \gamma^3 + r * V + s * V^2 + t * V^3 + \frac{u}{V} \quad (4.18)$$

Onde:

LC: Fator de correção para considerar a carga transportada;
k, n, p, q, r, s, t, u: constante da função; e
 γ : inclinação da via (%).

O fator de correção para considerar a inclinação da via é dado pela Equação 4.19:

$$GC = A * 6 * V^6 + A * 5 * V^5 + A * 4 * V^4 + A * 3 * V^3 + A * 2 * V^2 + A * 1 * V^1 + A * 0 * V^0 \quad (4.19)$$

Onde:

GC: fator de correção para considerar a inclinação da via; e
Ao ao A6: constante que variam de acordo com tipo de poluente, inclinação da via (%) e a velocidade.

Logo, a Equação 4.20 é o modelo ajustado para determinado poluente de um veículo específico.

$$E_{CORR} = E_{CO2} * MC * TC * LC * GC \quad (4.20)$$

Esse modelo necessita de alterações contantes, em função das tecnologias do motor e aerodinâmica de novos veículos.

4.3 Metodologia

A abordagem metodológica é elaborada com base no volume de diesel consumido em nível regional. A aplicação sob aspecto da frota ou cadastro total de veículos na cidade não é adequada, pois veículos de outras cidades podem circular temporariamente ou permanentemente na cidade. Essa distinção é apropriada para avaliar as emissões em áreas urbanas que carecem de dados sobre a frota circulante e não possuem informações sobre a curva de sucateamento. De acordo com Dodman (2009), a padronização para a realização de

inventários apresenta algumas deficiências, especialmente devido à realização em anos distintos, o que complica as comparações de resultados.

A proposta é apresentada através uma abordagem top-down, utilizando a metodologia do GHG Protocol (2006). Esse método é importante no sentido de ser de fácil aplicação, baixo custo e observação, uma vez que, a gênese dos dados são de origem nacional. Em relação à abordagem bottom-up, que ocorrem com apuração dos dados de maneira local, o método pode apresentar distorções que devem ser consideradas na análise. Como esse método exige maior esforço humano e recursos financeiros, a aplicação dessa abordagem é orientada para definir um resultado mais apurado. Logo, a maior orientação neste caso, seria a apuração dos resultados para a tomada de decisões em relação a aplicação de boas práticas e mudanças comportamentais. O objetivo desse trabalho é realizar uma abordagem de baixo custo para que as prefeituras, em suas localidades, possam realizar ações, de maneira a reduzir as emissões de gases e material particulado com enfoque na qualidade de vida da população local.

O GHG Protocol é a ferramenta mais utilizada por empresas privadas e entidades governamentais. Esse método é orientado para mensurar emissões diretas e indiretas dos gases de efeito estufa e pode ser aplicado para todos os modos de transporte. O GHG Protocol permite aplicação por dois métodos: consumo de combustível e quilometragem viajada. O consumo de combustível é mais confiável, pois as informações são extraídas da venda de combustível, enquanto a apuração da quilometragem viajada demanda de pesquisa profunda, demorada na sua aplicação e elevado custo, pois necessita de vários especialistas e empresas envolvidas.

A Equação 4.21 demonstra a estimativa considerando o combustível.

$$\text{Emissões de CO}_2 = \text{Combustível usado} * \text{Valor de Aquecimento} * FE \quad (4.21)$$

ou

$$\text{Emissões de CO}_2 = \text{Fator de emissão de CO}_2 * \text{Consumo de combustível} \quad (4.21.1)$$

$$\text{Emissões de CO}_2 \text{ (kg)} = \text{Fator de emissão de CO}_2 \text{ (kg/l)} * \text{consumo de combustível} \quad (4.21.1)$$

Onde:

Emissão de CO₂: Emissões de CO₂ (kg);

Emissão de CO₂ (sem necessidade de valor de aquecimento): analisar o fator de emissão;

Combustível usado: consumo de combustível (litros);

Valor de Aquecimento: Fator usado para converter o consumo em energia usada (GJ.litro);

FE: Fator de Emissão (kg CO₂.GJ).

Para calcular as emissões por distância percorrida, considerar a Equação (4.22).

$$\text{Emissões de CO}_2 = \text{Distância Percorrida} * FE \quad (4.22)$$

ou

$$\text{Combustível usado} = \text{Distância} * \text{Fator de Economia de Combustível} \quad (4.22.1)$$

Onde:

Fator de Economia do Combustível: depende do tipo de atividade executada pelo veículo (litros/l.km); e

Distância: distância percorrida pelo veículo (km).

Abaixo outras três alternativas para mensurar o consumo de energia, poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa (Equações 4.23, 4.24 e 4.25).

$$\begin{aligned} \text{Consumo de Energia (l, KWh ou Mj)} = \\ \text{Fator consumo de energia (l.km | kWh.km | ou MJ.km)} * \text{quilometragem percorrida (km)} \end{aligned} \quad (4.23)$$

$$\begin{aligned} \text{Poluentes Atmosférico (g)} = \\ \text{Fator de emissão do poluente (g.km)} * \text{quilometragem percorrida (km);} \end{aligned} \quad (4.24)$$

$$\begin{aligned} \text{Emissão de outros GEE (g)} = \\ \text{Fator de emissão dos outros GEE (g.km)} * \text{quilometragem percorrida (km)} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Esse método está dividido em quatro etapas indissociáveis para calcular as emissões de CO₂ e material particulado (combustível, freios, pneus e pista) conforme demonstrado na Figura 4.1. Esse método é aplicado desde o nível nacional até a níveis locais, logo, quando os dados são homogêneos (nacionais), dentro de cada etapa deve-se aplicar a calibração em relação a participação da frota analisada.

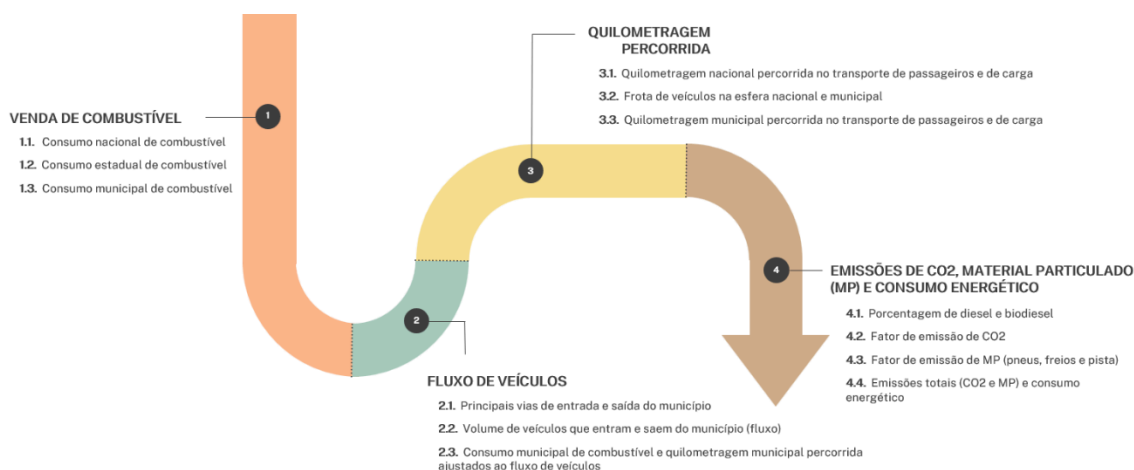


Figura 4.1. Diagrama do fluxo de trabalho com as etapas para mensurar as emissões de CO₂ e material particulado no consumo de diesel. Fonte: Produção própria.

● 1ª Etapa: Venda de diesel para veículos

Na etapa inicial, a abordagem é empregada para quantificar o consumo de diesel na cidade. Dependendo do grau de confiabilidade da pesquisa, a aquisição de dados através da abordagem de baixo para cima (*bottom-up*) representa um aprimoramento na confiabilidade do consumo de diesel em nível regional.

Para obter o volume de diesel veicular (Dv), em relação ao diesel total produzido (Dt), neste caso, desde o nível nacional, estados ou cidade, utiliza-se a nomenclatura *a* para um nível superior e *b* para um nível inferior. De toda forma, o procedimento ilustra a obtenção de dados em âmbito nacional (*top-down*), empregando a participação da frota a diesel (Fd) e a participação da frota total analisada (Ft). Esses dados são utilizados como variáveis da calibração da participação da

frota de veículos (Cf) e proporção de combustível (Pc). As Equações 4.26 e 4.27, exemplificam a calibragem e as Equações 4.28 e 4.29, a obtenção do consumo de diesel.

$$Cf_{\frac{b}{a}} = \frac{Fd_b}{Ft_a} \quad (4.26)$$

$$Pc_{\frac{b}{a}} = \frac{Fd_b}{Fd_a} \quad (4.27)$$

$$Dv_a = Cf_a * Pc_a \quad (4.28)$$

$$Dv_b = Pc_{\frac{b}{a}} * Dnv_a \quad (4.29)$$

Na primeira etapa, o principal objetivo é verificar o consumo de diesel por veículos nas cidades.

● 2ª Etapa: Fluxo de veículos

A segunda etapa é empregada para determinar o fator de compensação entre o fluxo de entrada e fluxo de saída de veículos rodoviários em determinado tempo, que consomem diesel na área analisada. A aplicação dessa etapa é realizada de acordo com as características da localidade, pois depende do posicionamento da cidade em relação a rodovias, pedágios, avenidas, áreas limítrofes etc. O fator de fluxo de veículos é empregado para calcular a correção dos veículos que após o abastecimento, eles emitem gases além dos limites da localidade onde foram abastecidos. Esse saldo poderá ser positivo ou negativo e deverá ser compensado do saldo final da venda de diesel. A Equação 4.30 exemplifica o fator do fluxo de veículo a diesel, Flx .

$$Flx_t = \frac{Vs}{Ve} \quad (4.30)$$

● 3ª Etapa: Quilometragem viajada

Na terceira etapa, realiza-se o cálculo da quilometragem média por veículo a diesel na área urbana e efetua-se o ajuste de acordo com o movimento dos veículos a diesel. A informação essencial é a quilometragem viajada na cidade ou a intensidade (Kvc). Na Equação 4.31 o resultado foi obtido através do produto da proporção do total de veículos a diesel na cidade pela quilometragem rodada nacional por veículos de consumo a diesel.

$$Kv_b = Kv_a * Pc_{\frac{b}{a}} \quad (4.31)$$

● 4ª Etapa: Emissões de CO₂ e MP

O fator de fluxo de veículo é empregado para corrigir o volume efetivo de veículos a diesel na cidade. Dessa maneira, é possível calcular o diesel consumido ajustado na cidade (Dva), a partir da Equação 4.32, e a quilometragem viajada ajustada na cidade (Kva), a partir da Equação 4.33. O resultado é obtido multiplicando as Equações 4.30 e 4.29 para calcular o consumo de diesel ajustado, e o produto das Equações 4.30 e 4.31 para determinar a quilometragem ajustada.

$$Dva = Flx * Dv_b \quad (4.32)$$

$$Kva = Flx * Kv_b \quad (4.33)$$

Para calcular as emissões de CO₂, conforme a Equação 4.34, deve-se verificar a proporção e o fator de emissão do diesel (D) e fator de emissão do biodiesel (B) nas proporções permitidas em cada fase do PROCONVE.

$$CO_2 = Dva[(\%D * Ftd) + (\%B * Ftb)] \quad (4.34)$$

Para calcular as emissões de MP nas cidades, conforme a Equação 4.35, deve-se verificar o fator de emissão de cada particulado [combustível (F_{pc}), freios e pneus (F_{ppf}) e pista (F_{pp})] em relação a Kva .

$$MP_{total}^{10} kg/km = kva(F_{pc} + F_{ppf} + F_{pp}) \quad (4.35)$$

A emissão de gases na atmosfera interage com as condições meteorológicas da cidade, e o sistema de transporte, especialmente os veículos a diesel, tem desempenhado um papel significativo na qualidade de vida da população. Segundo Ventura e Pinto (2013), Costa e Henkes (2013), e Loureiro (2005), as condições meteorológicas, em conjunto com os processos de combustão direta e indireta, contribuem para que os hidrocarbonetos (HC) e o óxido de nitrogênio (NOx) promovam a formação de ozônio (O₃), que é particularmente prejudicial aos seres humanos. Além disso, as emissões provenientes de veículos não reconhecem limites políticos ou geográficos, disseminando-se pela atmosfera. Por isso a importância de desenvolver procedimentos operacional, administrativos e regulatórios para mensurar as emissões provenientes de gases emitidos por veículos. A Figura 4.2 demonstra todo processo para mensurar as emissões de gases e material particulado.

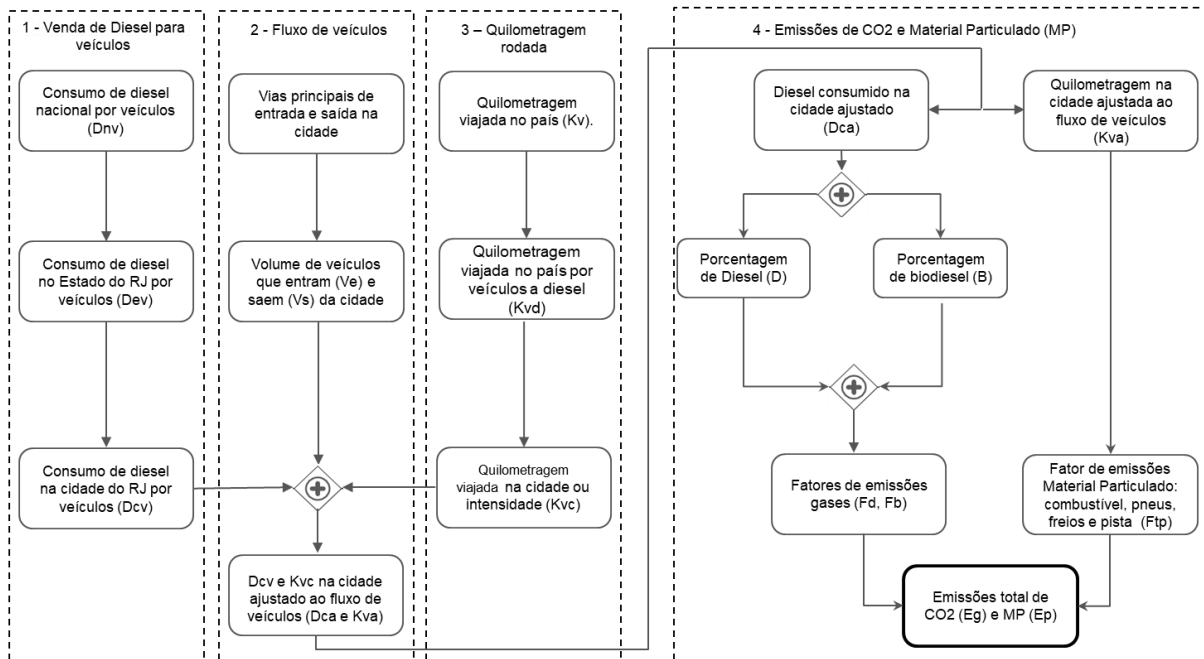


Figura 4.2. Processo esquemático para mensurar as emissões de CO₂ e MP de forma regional a partir do volume de diesel e biodiesel. Fonte: produção própria. Legenda: Dnv = diesel nacional por veículos; Dev = diesel estadual por veículos; Dcv = diesel da cidade por veículos; Ve = veículos diários que entram na cidade; Vs = veículos diários que saem da cidade; Kv = quilometragem viajada no país; Kvd = quilometragem viajada no país a diesel; Kvc = quilômetros viajados na cidade por veículos a diesel; Dca = diesel consumido na cidade ajustado; Kva = quilometragem de veículos a diesel na cidade ajustado; D = participação de diesel; B = participação de biodiesel; Fd = fator total das emissões de diesel; Fb = fator total de biodiesel; Ftp = fator total de cada material particulado [combustível (F_{pc}), pneus e freios (F_{ppf}), e pista (F_{pp})]; Eg = emissões de CO₂ e Ep = Emissões totais de material particulado.

O fundamento desse trabalho é desenvolver um procedimento top-down, acessível as secretárias de transportes (regional) para conhecer as emissões nas suas localidades e desenvolver políticas públicas que auxiliem a tomadores de decisão, assim como, a aplicação de boas práticas relacionadas a mudança de comportamento da população. A organização do trânsito, redução de gases poluentes e material particulado, aumento da caminhabilidade nas calçadas, aumento do transporte ativo, redução das ilhas de calor e poluição visual são condições que as cidades podem alcançar como benefício de externalidade para o bem-estar da população.

5. Resultados – Estado do Rio de Janeiro

A metodologia apresentada nesse trabalho, em parte, foi aplicada na cidade do Rio de Janeiro, em outrora, no trabalho intitulado “*Transport Sustainability Index: An Application Multicriteria Analysis*” na revista científica *Energies*. A pesquisa foi aplicada na cidade do Rio de Janeiro com objetivo de mensurar as emissões de CO₂ e material particulado. Neste trabalho, a aplicação foi aperfeiçoada em relação ao fluxo de veículos que entram e saem da cidade, justamente para determinar o fluxo real de veículos, entre aqueles que abastecem e queimam na própria cidade. O método é ajustado como principal variável no consumo de combustível, pois o resultado é mais preciso, uma vez que, o acesso aos dados da venda de combustíveis tem maior possibilidade de acerto, do que os dados de quilometragem viajada dos veículos combustão a diesel.

Os dados foram aplicados entre o período de 2001 a novembro de 2023. A Tabela 5.2 exemplifica as emissões de dióxido de carbono (CO₂) e a Tabela 5.3 o material particulado (MP) do combustível, freios, pneus e pista. Observa-se que a Figura 5.1 apresenta 2014 como pico de consumo de combustível no Brasil, depois desse período houve uma redução no consumo de 41,79%, e abaixo de 18,3% desde 2001, contudo durante a pandemia (depois de março de 2020), houve aumentos no consumo, com grande queda na produção a partir de 2023. Esses dados são recentes, mas podem refletir mudança do modo de transporte de carga, mudança no tipo de combustível utilizado e inclusão de veículos elétricos na frota circulante no Estado do Rio de Janeiro.

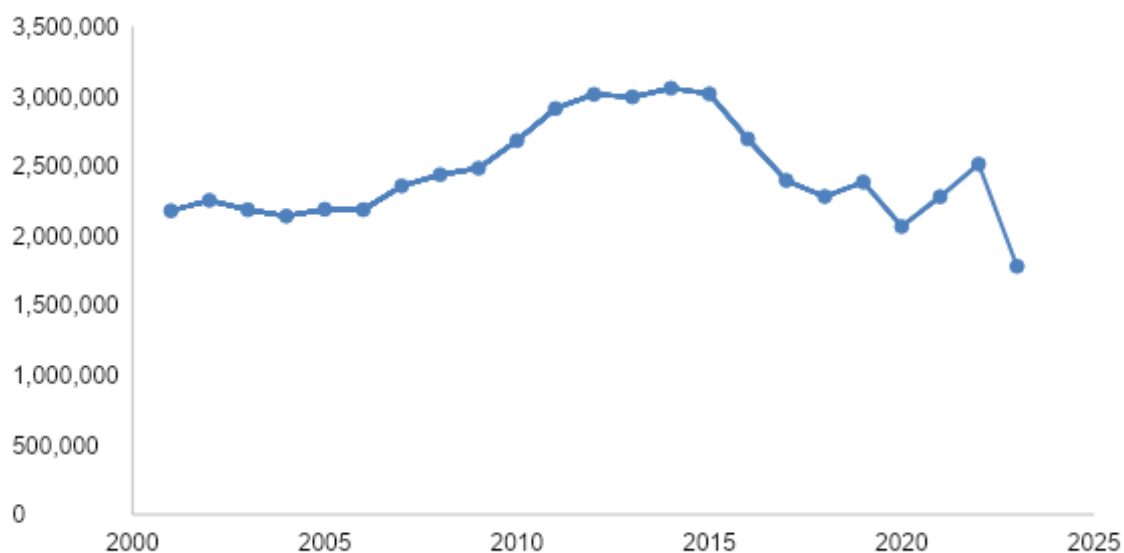


Figura 5.1. Consumo de diesel por ano (ANP) [m³]. Fonte: Produção Própria.

As Figuras 5.2 e 5.3 demonstram comportamentos antagônicos, pois existe uma forte correlação positiva referente a venda de combustível e as emissões de CO₂ proveniente do diesel de 0,9615, enquanto existe uma fraca correlação positiva referente a venda de combustível e as emissões de CO₂ proveniente do biodiesel de 0,3688. Essa relação é explicada com a adição, distribuída em vários anos de biodiesel, 2% em 2007 até 12% em 2023.

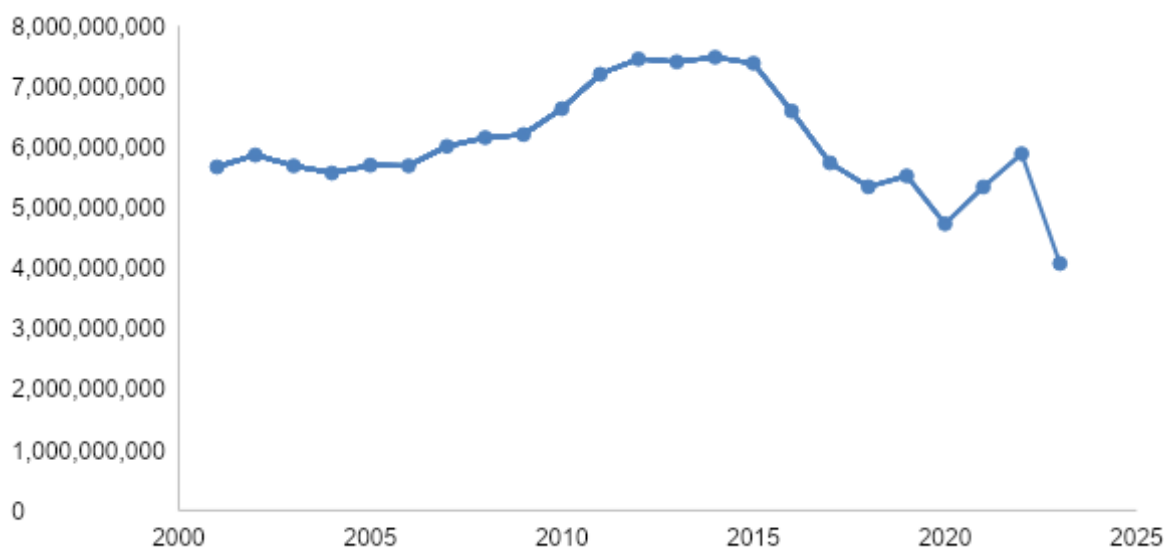


Figura 5.2. Emissão de CO₂ - Diesel (kg/ano). Fonte: Produção Própria.

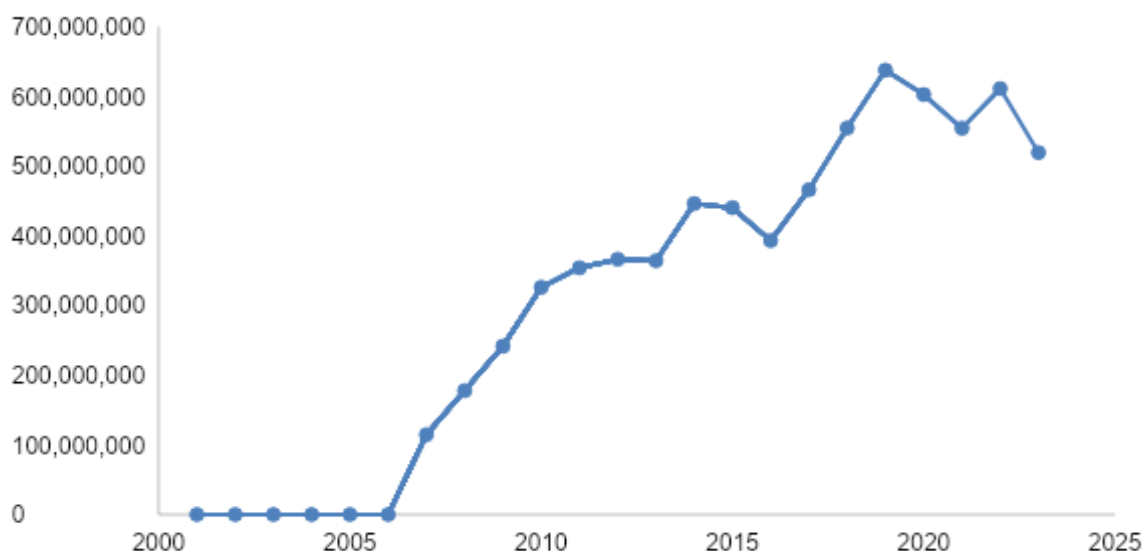


Figura 5.3. Emissão de CO₂ - Biodiesel (kg/ano). Fonte: Produção Própria.

Importa mencionar que, entre 2014 e 2023, o crescimento das emissões de CO₂ proveniente do biodiesel foi de 78,20% e uma redução de 16,56% das emissões de CO₂ proveniente do diesel tradicional. Contudo, houve uma redução de 11,23% na redução das emissões totais de CO₂ proveniente do diesel, apresentando tendência de queda. Como a proporção de diesel é maior, infere-se que houve um grande impacto na redução de CO₂ em veículos a combustão a diesel desde 2014. A figura 5.4 apresenta o resultado total das emissões de CO₂.

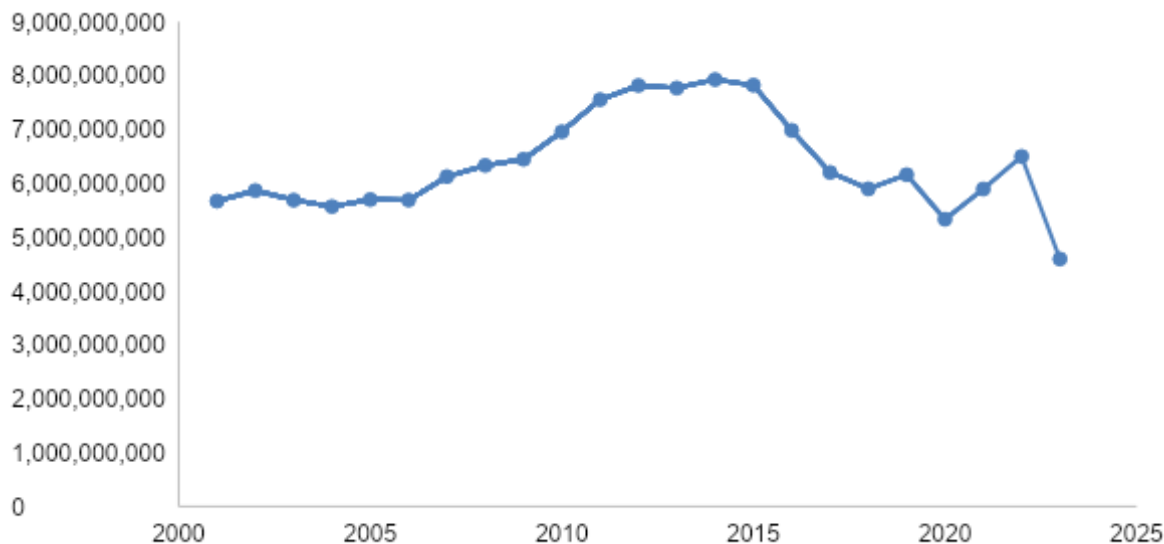


Figura 5.4. Emissão de CO₂ - TOTAL [kg/ano]. Fonte: Produção Própria.

Os dados do material particulado (MP) estão na Tabela 5.3 e estão relacionados com a quilometragem viajada por veículos a diesel no estado do Rio de Janeiro entre o período de 2001 a 2021. A Figura 5.5 demonstra o ponto máximo em 2014, assim como, o consumo de combustível por veículos a diesel. Contudo, não demonstra uma tendência de queda. Desde 2014, as emissões de MP reduziram em 4,5%, independente da redução do consumo de combustíveis.

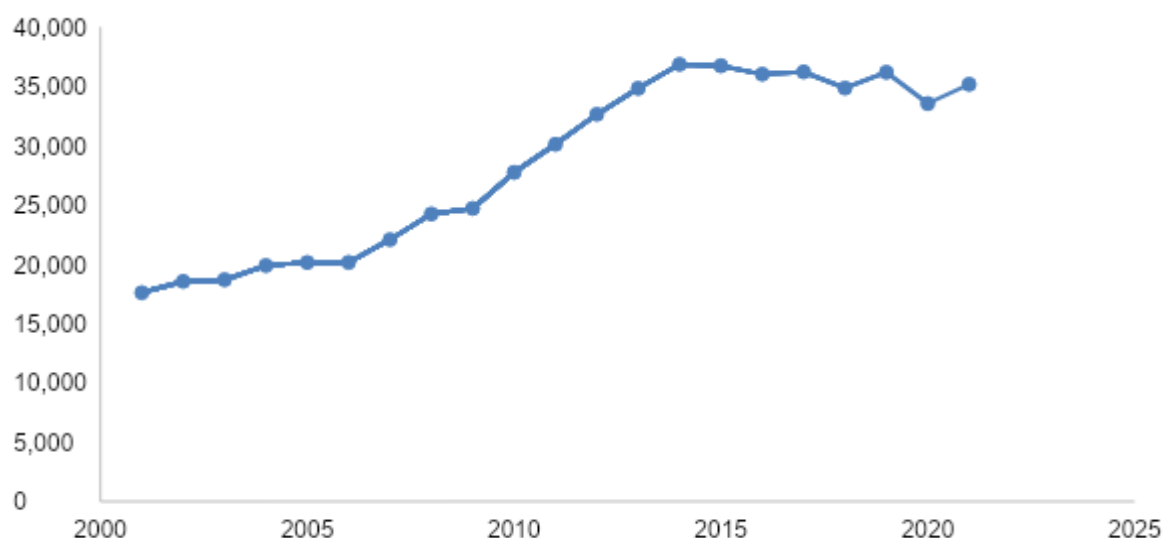


Figura 5.5. Emissões de material particulado M10 – Total [g/km]. Fonte: Produção própria.

As partículas totais de MP em veículos são calculadas de acordo com as emissões em combustível, freio, pneus e pista. Logo, a redução da queima de diesel, não é única variável causal, na variação da redução de particulados. O aumento da frota de veículos é fator determinantes para o aumento de partículas emitidas por veículos a diesel. Observando o período entre 2014 e 2023, houve um crescimento de 29,86% na frota e entre os períodos de 2001 a 2023, o crescimento foi de 200%. Os fatores de cada material particulado são diferentes, porém são correlacionados enquanto os veículos percorrem, conforme Tabela 5.1, consolidados na Equação 4.35.

Tabela 5.1. Matriz de Correlação Linear (Person)

	Consumo de diesel por ano [m³]	Emissão de CO2 - Diesel (kg/ano)	Emissão de CO2 - Biodiesel (kg/ano)	Emissões de MP M10 – Total [g/km]
Consumo de diesel por ano [m³]	1,0000	0,9615	0,3688	0,5672
Emissão de CO2 - Diesel (kg/ano)	0,9615	1,0000	0,0990	0,3285
Emissão de CO2 - Biodiesel (kg/ano)	0,3688	0,0990	1,0000	0,9421
Emissões de MP M10 – Total [g/km]	0,5672	0,3285	0,9421	1,0000

Legenda: ≤ 5 ■, $> 5 \leq 7$ ■, e > 7 ■.

A matriz de correlação apresenta informação da relação entre as emissões de CO₂, material particulado e consumo energético. Observa que existem somente duas variáveis com forte correlação destacadas em verde, uma em amarelo e três em vermelho, explicadas como:

- i. consumo de diesel e emissões de CO₂ proveniente do diesel – em ambas as variáveis ocorreram a redução da queima de diesel, observa-se no ANEXO (Frota de veículos), no mesmo período analisado, a frota de veículos a diesel aumentaram, isso reflete a

mudança do modo de transporte de carga, mudança no tipo de combustível e inclusão de veículos elétricos na frota circulante.

- ii. consumo de diesel e emissões de material particulado – o consumo de diesel apresentou uma queda de 41,79% desde 2014, onde ocorreu o ponto máximo de queima de diesel. Mesmo com essa queda, as emissões do MP permaneceram constante. Isso ocorreu, pois a inclusão de veículos elétricos foi de apenas 394 veículos, não refletindo 2% da frota a diesel, contudo, como aumentaram a venda de veículos, as emissões sobre freios, pneus e pista fizeram com que as emissões de particulados possuíssem baixa variabilidade.
- iii. emissões de CO₂ proveniente do diesel e emissões de CO₂ proveniente do biodiesel – essa relação é satisfatória e reflete o esforço para a redução as emissões de CO₂, pois enquanto ocorreram a redução das emissões da queima do diesel, no mesmo momento ocorreram o aumento das emissões da queima do biodiesel. Contudo, ambas possuem escalas diferentes e fatores de queima diferentes. Logo, a adição do biodiesel é um esforço para reduzir as emissões totais de CO₂ em transporte.
- iv. Emissões de CO₂ proveniente do diesel e emissões de material particulado – a resultado é similar ao item ii, pois ocorreram a redução das emissões de CO₂ na queima do diesel, sendo em maior proporção, o impacto nas emissões totais ainda é muito grande, e no mesmo período o material particulado permaneceram constante, justamente pelo aumento da frota circulante no mesmo período.
- v. Consumo de diesel e emissões de CO₂ proveniente do biodiesel – como mencionado, mudança no modo de transporte, tipo de combustível e inclusão de veículos elétricos na frota circulante, reduziram o consumo de diesel em transporte, contudo as emissões de CO₂ na queima de biodiesel aumentaram devido ao incentivo, sabendo que o fator de emissões de biodiesel é menor que o fator de emissão do CO₂, e os impactos das desvantagens do biodiesel, ainda são menor que os impactos dos aumentos das emissões de CO₂.

Tabela 5.2. Emissões de CO₂ de veículos de combustão a diesel no estado do Rio de Janeiro (Combustível diesel com adição de biodiesel)

Emissões de CO ₂ - Estado do Rio de Janeiro										
ANO VIGENTE	Fase PROCONVE	Consumo Diesel por ano (ANP) [m ³]	Total de veículos no país: DIESEL	Total de veículos no Estado: DIESEL	Teor de Diesel no produto vendido (PROCONVE)	Teor de Biodiesel no produto vendido (PROCONVE)	Fator de emissão (kg/L)	Emissão de CO ₂ - Diesel	Emissão de CO ₂ - Biodiesel	Emissão de CO ₂ TOTAL [kg/ano]
2001	P3/P4	2.177.980	5.393.051	343.812	100%	0%	2,603	5.669.281.328	0	5.669.281.328
2002	P4	2.253.093	5.682.855	366.591	100%	0%	2,603	5.864.801.402	0	5.864.801.402
2003	P4	2.184.690	5.944.025	380.605	100%	0%	2,603	5.686.747.182	0	5.686.747.182
2004	P4/P5	2.139.262	6.230.032	396.307	100%	0%	2,603	5.568.499.491	0	5.568.499.491
2005	P4/P5	2.188.716	6.615.516	413.553	100%	0%	2,603	5.697.228.539	0	5.697.228.539
2006	P4/P5	2.185.277	6.978.231	432.664	100%	0%	2,603	5.688.276.567	0	5.688.276.567
2007	P4/P5	2.355.824	7.434.145	456.223	98%	2%	2,600	6.009.565.854	114.540.166	6.124.106.020
2008	P5	2.437.017	8.002.687	484.580	97%	3%	2,598	6.153.249.674	177.731.681	6.330.981.355
2009	P5	2.482.818	8.624.740	518.781	96%	4%	2,596	6.204.263.817	241.429.206	6.445.693.023
2010	P5	2.681.354	9.445.189	568.375	95%	5%	2,594	6.630.586.090	325.918.571	6.956.504.662
2011	P5	2.911.126	10.370.430	627.959	95%	5%	2,594	7.198.777.189	353.847.329	7.552.624.517
2012	P7	3.012.726	11.261.474	685.081	95%	5%	2,594	7.450.018.682	366.196.806	7.816.215.488
2013	P7	2.994.175	12.195.726	739.675	95%	5%	2,594	7.404.144.432	363.941.911	7.768.086.344
2014	P7	3.056.993	13.111.807	792.715	94%	6%	2,593	7.479.911.730	445.893.006	7.925.804.736
2015	P7	3.016.421	13.733.440	829.357	94%	6%	2,593	7.380.638.773	439.975.140	7.820.613.913
2016	P7	2.693.300	14.240.949	853.934	94%	6%	2,593	6.590.019.677	392.844.701	6.982.864.378
2017	P7	2.395.031	14.778.227	870.422	92%	8%	2,589	5.735.524.984	465.785.673	6.201.310.657
2018	P7	2.280.227	15.449.335	894.168	90%	10%	2,586	5.341.886.945	554.323.096	5.896.210.041
2019	P7	2.383.341	16.181.172	923.385	89%	11%	2,584	5.521.414.277	637.329.180	6.158.743.457
2020	P7	2.064.739	16.754.122	941.813	88%	12%	2,582	4.729.572.834	602.325.545	5.331.898.379
2021	P7	2.279.122	17.479.339	970.792	90%	10%	2,586	5.339.298.676	554.054.513	5.893.353.189
2022	P7/P8	2.512.930	18.213.503	998.501	90%	10%	2,586	5.887.041.669	610.893.341	6.497.935.009

2023	P7/P8	1.779.386	18.955.037	1.029.486	88%	12%	2,582	4.075.931.888	519.082.375	4.595.014.263
------	-------	-----------	------------	-----------	-----	-----	-------	---------------	-------------	---------------

Tabela 5.3. Emissão de Material Particulado M10 – combustível, Freios, pneus e pista

Quilometragem viajada nacional (km-SEEG) (Milhares)	Participação (%) estadual de veículos a Diesel	Quilometragem viajada estadual	Quilometragem viajada estadual ajustada	Emissões de Particulado M10 - Combustível [g/km]	Emissões de Particulado M10 - Freio [g/km]	Emissões de Particulado M10 - Pneus e Pistas [g/km]	Emissões de Particulado TOTAL M10 - [g/km]
425.868	0	27.149	-	543	16.018	1.032	17.593
443.710	0	28.623	-	572	16.888	1.088	18.548
450.311	0	28.834	-	577	17.012	1.096	18.684
482.242	0	30.677	-	614	18.099	1.166	19.878
497.196	0	31.081	-	622	18.338	1.181	20.140
501.543	0	31.097	-	622	18.347	1.182	20.151
554.898	0	34.053	-	681	20.091	1.294	22.067
617.526	0	37.393	-	748	22.062	1.421	24.230
633.738	0	38.120	-	762	22.491	1.449	24.701
711.062	0	42.789	-	856	25.245	1.626	27.727
766.972	0	46.442	-	929	27.401	1.765	30.095
827.571	0	50.344	-	1.007	29.703	1.913	32.623
885.786	0	53.723	-	1.074	31.697	2.041	34.813
940.255	0	56.846	-	1.137	33.539	2.160	36.836
938.189	0	56.657	-	1.133	33.428	2.153	36.714
926.614	0	55.563	-	1.111	32.782	2.111	36.005
948.504	0	55.866	-	1.117	32.961	2.123	36.201
928.832	0	53.758	-	1.075	31.717	2.043	34.835
977.978	0	55.809	-	1.116	32.927	2.121	36.164
920.590	0	51.750	-	1.035	30.532	1.966	33.534
976.788	0	54.250	-	1.085	32.008	2.062	35.154

Indicadores de Desempenho

✓ Publicação de artigos em periódicos indexados:

Encontra-se em andamento a elaboração de dois artigos, a ser submetido a um periódico indexado, sobre aumento das emissões de CO₂, proveniente do desgaste do motor e doenças respiratórias versus material particulado.

✓ Orientação de Mestrado

Victor Azeredo Arueira. Proposta de Metodologia para Inventário de CO₂ para o Transporte de Carga Brasileiro. Início: 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.

✓ Participação em congressos:

de Freitas, R.R.; de Oliveira, C.M.; Caetano, J.A. Proposta metodologia de reconhecimento de transporte de carga sustentável. In: 37º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Santos, SP, 2023.

Conclusões

O processo metodológico é o principal caminho prático para que as informações possam ser disseminadas. A realização de uma metodologia de baixo custo com dados disponíveis e fácil entendimento foi o caminho percorrido neste trabalho. A demonstração de algumas das principais metodologias utilizadas para mensurar as emissões de gases e material particulado, por mais que sejam eficientes, compromete o objetivo prático e rápido na aplicação dos dados para tomada de decisão. Existem metodologias mais avançadas e mais bem acuradas, contudo, exigem mais tempo, alto custo e participação de vários especialistas. A aplicação de uma metodologia *top-down* com calibragem em variáveis regionais foi satisfatória para aplicação local.

Deste o primeiro trabalho, a revisão abordou temas contemporâneos, em que as cidades possam desenvolver a sua infraestrutura para reduzir os impactos negativos e preparar a economia local, comportamento social e a sustentabilidade de toda sociedade. Nesse segundo trabalho foram abordados temas relacionados a: incentivo a troca da frota circulante, desgaste do motor, consumo energético, emissões de gases e material particulado. Esses assuntos devem ser tratados no cotidiano das pessoas, de maneira irreversíveis e sistemática.

Espera-se que os resultados apurados possam suportar as decisões dos gestores privados, e principalmente públicos, pois o conhecimento das emissões de gases, material particulado e consumo energético em transporte poderá contribuir para uma cidade organizada, segura, limpa e sem poluição. O objetivo é preparar para o crescimento e desenvolvimento econômico regional, em que a população, comercio, institutos públicos e privados possam estar no mesmo local, prezando pelo desenvolvimento sustentável da mobilidade urbana, incentivado por um sistema de transporte menos poluentes e mais amigável.

Proponente: Cintia Machado de Oliveira

Referências

1. ABRASCE. Guia de Shoppings 2023. Disponível em: <https://abrasce.com.br/guia-de-shoppings/?state=RJ&city=&letter=>. Acesso em 19 de out. 2023.
2. ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico - 2023a. Eletrificados: novo recorde no semestre. ABVE. Disponível em: <http://www.abve.org.br/eletrificados-novo-recorde-no-semester/>. Acesso em 04 de out. 2023.
3. AGÊNCIA BRASIL. Efeito estufa: transporte responde por 25% das emissões globais. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2018-12/efeito-estufa-transporte-responde-por-25-das-emissoes-globais#:~:text=O%20setor%20de%20transporte%20contribui,carbono%20mais%20crescem%20desde%202000>. Acesso em 12 de out. de 2023.
4. AHARI, H.; PHILLIPS, J. S.; PAULY, T. Statistical Approach to Diesel Aftertreatment Accelerated Aging Performance Correlation to In-Use Population. *Emission Control Science and Technology*, v. 7, n. 2, p. 79–90, 1 jun. 2021. <https://doi.org/10.1007/s40825-020-00180-0>.
5. Al, Y. et al. Study on the control targets and measures for total diesel consumption from mobile sources in Beijing, China. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 25 nov. 2022. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1068861>.
6. AMBIENTE BRASIL. Caminhões de lixo são os que mais emitem dióxido de carbono. 24 de out. 2011. Disponível em: <https://noticias.ambientebrasil.com.br/clipping/2011/10/24/75973-caminhoes-de-lixo-sao-os-que-e-mais-emitem-dioxido-de-carbono.html>. Acesso em 25 de out. 2023.
7. ANFAVEA 2020. Coletiva de Imprensa: A ANFAVEA defende o PROCONVE. 2020. Disponível em: https://anfavea.com.br/docs/apresentacoes/apresentacao_dezembro_2020_PROCONVE.pdf.
8. ANL. Greet life cycle model: mathematical model. Center for Transportation Research Energy System Division – Argonne National Laboratory. P 13. 2003.
9. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas). 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>. Acesso em 25 de out. 2023.
10. Associação Brasileira do Veículo Elétrico – ABVE – 2023b. Os oito meses que mudaram a eletromobilidade. Disponível em: <http://www.abve.org.br/oito-meses-que-mudaram-o-mercado-de-eletromobilidade/>. Acesso em 04 de out. 2023.
11. BARROS, L.R. Oportunidades de implementação de veículos elétricos por tipo de serviço logístico. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, UFRJ. 2021
12. BEYDOUN, M., and J.-M. GULDMANN. Vehicle characteristics and emissions: Logit and regression analyses of I/M data from Massachusetts, Maryland, and Illinois. *Transport. Res. D Transport Environ.* 11:59–76. 2006. doi:10.1016/j.trd.2005.09.003.
13. BODDEY, R., ALVES, B. J. R., SOARES, L.H.B., URQUIAGA, S. *Biological nitrogen fixation and the mitigation of greenhouse gas emissions*. Agronomy Monograph. 2009. doi:10.2134/agronmonogr52.c14. 2008.
14. BOULTER, P.G.; Mccrae, I.S. *Artemis: assessment and reliability of transport emission models and inventory system – Final report*. Transport Research Laboratory Limited, p. 346. 2007.

15. BRASIL. Caderno Técnico de Referência para Eletromobilidade nas cidades brasileiras (Volume I). Fundo de Tecnologia Limpa - CTF (financiador), Ministério do Desenvolvimento Regional - MDR e Banco Mundial (autores), Brasília. 2022b. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/caderno-tecnico-de-referencia-para-eletromobilidade-nas-cidades-brasileiras-2013-volume-i-portugues.pdf>. Acesso em 19 de out. 2023.
16. BRASIL. Guia de Eletromobilidade – Orientações para estruturação de projetos no transporte coletivo por ônibus. Ministério do Desenvolvimento Regional e Banco Interamericano de Desenvolvimento. 2022a. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eletromobilidade.pdf. Acesso em 24 de out. 2023.
17. BRASIL. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Brasília, DF, 2013.
18. BYD. Caminhões 100% elétricos BYD eT7 12.220 e eT18 21.250. 2022. Disponível em: <https://www.byd.com.br/wp-content/uploads/2022/12/Folder-et7-et18-2022-compactado-1.pdf>. Acesso em 25 de out. 2023.
19. CARVALHO, C.H.R. *Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros*. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). 2011.
20. CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Relatório de qualidade do ar do estado de São Paulo – 2009. São Paulo, 292 p
21. CETESB. Gases do Efeito Estufa. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/>. Acesso em 12 de out. 2022.
22. CETESB. Plano de Controle de Poluição Veicular 2014–2016; São Paulo, 58 p. 2014.
23. CHEN, Y.; BORKEN-KLEEFELD, J. NOx Emissions from Diesel Passenger Cars Worsen with Age. *Environmental Science & Technology*, v. 50, n. 7, p. 3327–3332, 9 mar. 2016. [10.1021/acs.est.5b04704](https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04704).
24. CHIANG, H.L., TSAI, J.H., YAO, Y.C., HO, W.Y. Deterioration of gasoline vehicle emissions and effectiveness of tune-up for high-polluted vehicles. *Transport. Res. Transport Environ.* 13 (1), 47–53. 2008. [10.1016/j.trd.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.trd.2007.07.004).
25. CLARK, N. N.; KERN, J. M.; ATKINSON, C. M. Factors Affecting Heavy-Duty Diesel Vehicle Emissions. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 52, n. 1, p. 84–94, jan. 2002. : <https://doi.org/10.1080/10473289.2002.10470755>.
26. CNPE - Conselho Nacional de Política Energética. (2023). Disponível em: < <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/cnpe-aprova-antecipacao-do-b14-para-marco-o-de-2024-e-b15-para-marco-de-2025-incentivando-a-producao-de-bicombustiveis-e-a-transicao-energetica>>. Acesso em: 21/12/2023.
27. CNPE - Conselho Nacional de Política Energética. *Relatório de consolidação dos testes e ensaios para validação da utilização de Biodiesel B15 em motores e veículos*. Brasília. 2019.
28. COSTA, F. A. A., HENKES, J. A. Uma Breve Análise da Qualidade do Ar da Cidade De São Paulo. *R. gest. sust. ambient.* v.2, n.1, p. 250 – 264. 2013. <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v2e12013250-264>.
29. DAVISON, J. et al. Gasoline and diesel passenger car emissions deterioration using on-road emission measurements and measured mileage. *Atmospheric Environment: X*, v. 14, p. 100162, abr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aea.2022.100162>.
30. DEVARAJAN, Y., MUNUSWAMY, D. B., MAHALINGAM, A. P. Performance, combustion and emission analysis on the effect of ferrofluid on neat biodiesel. *Process Safety and Environment Protection*. S0957-5820(17) 30235-5. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.021>.
31. DODMAN, D. Blaming cities for climate change? An analysis of urban greenhouse gas emissions inventories. *Environment and Urbanization* 21: 185. 2009. <https://doi.org/10.1177/0956247809103016>.

32. E-BUS RADAR. *Plataforma de ônibus elétricos na América Latina*. Desenvolvido pelo LABMOB-UFRJ, em parceria com Zebra, C40, ICCT. 2023. Disponível em: <https://www.ebusradar.org>. Acesso em: 25 de out. 2023.
33. EDP - Energias de Portugal. *Mobilidade elétrica: em que ponto estamos?* 2022. Disponível em: <https://www.edp.com/pt-pt/historias-edp/mobilidade-eletrica-em-que-ponto-estamos>. Acesso em 15 de dez. 2023
34. EGGLESTON, S.; BUENDIA, L.; MIWA, k. 2006 *IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: energy*. Kanagawa, JP: Institute for Global Environmental Strategies, v. 2. 2006.
35. EMBRAPA. Estudo mostra que etanol de cana emite menos gás carbônico para a atmosfera do que a gasolina. 2009. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18044516/estudo-mostra-que-etanol-de-cana-emite-menos-gas-carbonico-para-a-atmosfera-do-que-a-gasolina>. Acesso em 03 de out. 2023.
36. ENERGISA-NDU-042. Fornecimento de energia para estações de recarga de veículo elétrico. Energisa. 2021.
37. EPA – ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2000) AP-42: Compilation of air pollutant emission factors – mobil sources, office of transportation and air quality. Disponível em:. Acesso em: jan 2024.
38. EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Iniciativas nas cidades para o uso inteligente da energia. Informe Técnico. NIT-EPE-DEA-SEE-001/2022. 2022. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-519/topico-626/IT2%20-%20Iniciativas%20na%20cidades%20para%20o%20uso%20inteligente%20da%20energia.pdf>. Acesso em: 23 de out 2023.
39. FAYYAZBAKHS, A. et al. Engine emissions with air pollutants and greenhouse gases and their control technologies. *Journal of Cleaner Production*, v. 376, p. 134260, nov. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134260>.
40. FERREIRA et al. *Emissões dos Setores de Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos - SEEG*. Instituto de Energia e Meio Ambiente – IEMA. 2017.
41. GAO, Z.; LIN, Z.; DAVIS, S. C.; BIRKY, A. K. Quantitative Evaluation of MD/HD Vehicle Electrification using Statistical Data. *Transportation Research Record*, Vol. 2672(24) 109-121. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1177/0361198118792329>.
42. GLAESER, E. L., KAHN, M. E. The greenness of cities: Carbon dioxide emissions and urban development. *Journal of Urban Economics*, 67, 404–418. 2010.
43. GÖHLICH, D.; GRÄBENER, S. Identification of User-oriented Electric Commercial Vehicle Concepts with a Particular Focus on Auxiliaries. In: *Proceedings of the 25th Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology*, Aachen, Germany, p. 10–12. 2016.
44. GOLOKHAVAST, K. S., CHERNYSHEV, V. V., CHAIKA, V. V., UGAY, S. M., ZELINSKAYA, E. V., TSATSAKIS, A. M., ... SARIGIANNIS, D. A. Size-segregated emissions and metal content of vehicle-emitted particles as a function of mileage: Implications to population exposure. *Environmental Research*, 142, 479–485. 2015. [doi:10.1016/j.envres.2015.07.018](https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.07.018).
45. GREENE, D. L., LIU, J., KHATTAK, A. J., WALI, B., HOPSON, J. L., & GOELTZ, R. How does on-road fuel economy vary with vehicle cumulative mileage and daily use? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 142–161. 2017. [doi:10.1016/j.trd.2017.06.004](https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.004).
46. GUO, L., GAO, B., GAO, Y. CHEN, H. (2017). Optimal Energy Management for HEVs in Eco-driving Applications Using Bi-Level MPC. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. V: 18, 8. 2153 – 2162. 2017. <https://doi.org/10.1109/TITS.2016.2634019>.
47. HAO, L. et al. Study of durability of diesel vehicle emissions performance based on real driving emission measurement. *Chemosphere*, v. 297, p. 134171, 1 jun. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134171>.
48. HICKMAN, J. et al. *Methodology for Calculating Transport Emission and Energy Consumption*. Transport Research Laboratory. P 362. 1999.

49. IBAMA – INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS RENOVÁVEIS. Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE/PROMOT. Coleção Meio Ambiente. Série Diretrizes – Gestão Ambiental, v. I, II, III.
50. IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. Disponível em: <Aumento da velocidade dos ônibus durante pandemia reduziu as emissões desse modo de transporte em São Paulo, segundo nova ferramenta do IEMA>. Acessado em: 21/12/2023.
51. INEA. Inventário EMISSÕES DE FONTES VEICULARES Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.inea.rj.gov.br/wp-content/uploads/2019/01/Invent%C3%A1rio-de-Emiss%C3%B5es-de-Fontes-Veiculares.pdf>>. Acessado em: 20/12/2023.
52. KANEKO, M., & KAGAWA, S. Driving propensity and vehicle lifetime mileage: A quantile regression approach. *Journal of Environmental Management*, 278, 111499. 2021. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111499.
53. KARA, O. N. Environmental and economic sustainability of zero-emission bus transport. 2019. University of Twente, Holanda, 2019. Dissertação (Mestrado em Industrial Engineering & Management). Disponível em: <http://essay.utwente.nl/78088>. Acesso em 24 de out. 2023.
54. KEUKEN, M.P.; JONKERS, S.; WILMINK, I.R.; WESSELING, J. Reduced NOx and PM10 emissions on urban motorways in The Netherlands by 80 km/h speed management. *Sci. Total Environ.* 2010, 408, 2517–2526. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.03.008>.
55. KOSTENIDOU, E. et al. Technical note: Emission factors, chemical composition and morphology of particles emitted from Euro 5 diesel and gasoline light duty vehicles during transient cycles. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2021. <https://doi.org/10.5194/acp-21-4779-2021>.
56. LAU, J., W. HUNG, AND C. CHEUNG. Observation of increases in emission from modern vehicles over time in Hong Kong using remote sensing. *Environ. Pollut.* 163:14–23. 2012. doi:10.1016/j.envpol.2011.12.021.
57. LAU, J., W. HUNG, AND C. CHEUNG. On-board gaseous emissions of LPG taxis and estimation of taxi fleet emissions. *Sci. Total Environ.* 409:5292–300. 2011. doi:10.1016/j.scitotenv.2011.08.054.
58. LIGHT. Disponível em: www.light.com.br. Acessado em 25 out. 2023.
59. LIGTERINK, N. E.; VAN Zyl, P. S.; HEIJNE, V. A. M. Dutch CO2 Emission Factors for Road Vehicles. Utrecht: TNO R10499. 2016.
60. LIU, H. et al. How aging process changes characteristics of vehicle emissions? A review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, v. 50, n. 17, p. 1796–1828, 28 set. 2019. <https://doi.org/10.1080/10643389.2019.1669402>.
61. LOUREIRO, C. F. B. et al. Complexidade e dialética: contribuições à práxis política e emancipatória em educação ambiental. *Educação e Sociedade*, Campinas, v. 26, n. 93, p.1473-1494. 2005. <https://doi.org/10.1590/S0101-73302005000400020>.
62. LYU, L. et al. NOx emission deterioration in modern heavy-duty diesel vehicles based on long-term real driving measurements. *Environmental Research*, v. 232, p. 116396–116396, 1 set. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116396>.
63. LYU, M. et al. State-of-the-art outlook for light-duty vehicle emission control standards and technologies in China. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v. 22, n. 4, p. 757–771, 27 mar. 2020. <https://doi.org/10.1007/s10098-020-01834-x>.
64. MACEDO, I. C., SEABRA, J. E., SILVA, J. E. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy*, 32, p. 582-595. 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>.
65. MADIREDDY, M.; de COENSEL, B.; CAN, A.; Degraeuwe, B.; Beusen, B.; de Vlieger, I.; Botteldooren, D. Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2011, 16, 504–508. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.06.001>.

66. MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON, M.; KANAROGLOU, P. Electric buses: A review of alternative powertrains. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62, 673–684. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.019>.
67. MERCER, B. G.; HESSE, M. C. S. *Aplicação de um alimentador para realizar a análise do impacto de veículos elétricos no sistema de distribuição*. UFPR. Trabalho Final de Curso. 2019.
68. MMA. 1o INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS Relatório Final. 2011. Disponível em: <http://antigo.antt.gov.br/html/objects/_downloadblob.php?cod_blob=540>. Acesso em: 20 dez 2023.
69. MMA. 2o INVENTÁRIO NACIONAL DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS POR VEÍCULOS AUTOMOTORES RODOVIÁRIOS Relatório Final. 2013. Acesso em: 20 dez 2023.
70. MOBILIDADE ESTADÃO. Brasil chega a 3.200 eletropostos de recarga. 2023b. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/brasil-chega-a-3-200-eletropostos-de-recarga/>. Acesso em 11 de out. 2023.
71. MOBILIDADE ESTADÃO. Carro elétrico: parcerias elevam número de postos de recarga no Brasil. 2023a. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/mobilidade-eletrica-parcerias-eleva-m-numero-de-postos-de-recarga-no-brasil/>. Acesso em 20 de out. 2023.
72. MORA, E. F., TORRES, C., Valero, A. Thermo-economic Analysis of Biodiesel Production from Used Cooking Oils. *Sustainability* 2015, 7, 6321-6335. 2015. <https://doi.org/10.3390/su7056321>.
73. NAGPURE, A. S. et al. Estimation of exhaust and non-exhaust gaseous, particulate matter and air toxics emissions from on-road vehicles in Delhi. *Atmospheric Environment*, v. 127, p. 118–124, fev. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.12.026>.
74. NATURAL RESOURCES CANADA. Learn the facts: Emissions from your vehicle. Auto Smart. 2014.
75. OBERG M, JAAKKOLA, M. S., WOODWARD, A., PERUGA, A., PRÜSS-USTÜN, A. Worldwide burden of disease from exposure to second-hand smoke: a retrospective analysis of data from 192 countries. *Lancet*. 377(9760):139-46. 2011. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)61388-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)61388-8).
76. PACHECO M. T. et al. A review of emissions and concentrations of particulate matter in the three major metropolitan areas of Brazil. *Journal of transport and health*, v. 4, p. 53–72. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jth.2017.01.008>.
77. PANIS, L.I; BROEKX, S.; LIU, R. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Sci. Total Environ*. 2006, 371, 270–285.
78. PATANKAR, N. A.; LIN, J.; PATANKAR, T. N. Mileage efficiency of cars. *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 4, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100240>.
79. PREFEITURA DE POÇOS DE CALDAS. Poços de Caldas inaugura eletroposto de recarga rápida autossuficiente. 2021. Disponível em: <https://pocosdecaldas.mg.gov.br/noticias/pocos-de-caldas-inaugura-eletroposto-de-recarga-rapida-autossuficiente/>. Acesso em 10 de out. 2023.
80. PROCONVE - *Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores*. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA. 3 ed. Brasília. 2011.
81. PROCONVE. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). Disponível em: <<https://www.ibama.gov.br/programasilencio/118-emissao-e-residuos/emissoes/veiculos-auto-motores/720-programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>>.
82. RAJAEIFAR, M. A. et al. Attributional and consequential environmental assessment of using waste cooking oil- and poultry fat-based biodiesel blends in urban buses: a real-world operation condition study. *Biofuel Research Journal* 15, 638-653. 2017. <https://doi.org/10.18331/BRJ2017.4.3.3>.
83. REPORT C 387 - Study on the durability of European passenger car emission control systems utilizing remote sensing data. Disponível em: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473abc/1628417625519/FULLTEXT01.pdf>.

84. ROSOLEM, M. F. Baterias de Lítio-íon: desafios e oportunidades. Seminário sobre Acumuladores de Energia – Ministério da Defesa - DECTI. 2018.
85. SANTOS, H. L. V. Comprar, Passear e Ser Visto: contributos para a compreensão das escolhas de usuários de dois shopping centers brasileiros. Dissertação de Mestrado. Universidade Fernando Pessoa. 2019.
86. SCHRÖDER, D. et al. Ending the myth of mobility at zero costs: An external cost analysis. *Research in Transportation Economics*, v. 97, p. 101246, 1 mar. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2022.101246>.
87. SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões brasileiras de Gases de Efeito Estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2019. 2020.
88. SHENG, S. et al. Evaluating the In-Service Emissions of High-Mileage Dedicated Methanol-Fueled Passenger Cars Regulated and Unregulated Emissions. *Energies* 2020, 13(11), 2680; <https://doi.org/10.3390/en13112680>.
89. SILVA, A. C. A.C.; PIZZOLATO, N. D. Utilização de veículos elétricos no transporte de carga e os desafios para implementação no Brasil Ambiente e Sociedade. vol. 25. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc20210128r1vu2022L3AQ>.
90. SOARES, J., MARIANO, A. P., DE ANGELIS, D.D. Biodegradation of biodiesel/diesel blends by *Candida viswanathii*. *Afr. J. Biotechnol.* 8, 2774–2778. 2009.
91. TANG, G. et al. Study on pollutant emission characteristics of different types of diesel vehicles during actual road cold start. *Science of The Total Environment*, vol. 823, 1 June 2022, 153598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153598>.
92. TZEIRANAKI, S.T. et al. The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector. *Transport. Res. A: Policy and Practice*, vol. 170, April 2023, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.trra.2023.103623>.
93. UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Alternative Fuels Data Center. 2023. Disponível em: [https://afdc.energy.gov/vehicles/flexible_fuel_emissions.html#:~:text=Carbon%20dioxide%20\(CO2\)%20released,conventional%20vehicles%20per%20mile%20traveled](https://afdc.energy.gov/vehicles/flexible_fuel_emissions.html#:~:text=Carbon%20dioxide%20(CO2)%20released,conventional%20vehicles%20per%20mile%20traveled). Acesso em 04 de out. 2023.
94. URQUIAGA, S. ALVES, B.J.R., BOODEY, R. M. Produção de biocombustíveis A questão do balanço energético. *Revista de política agrícola*. V. 14, 1, 42-46. 2005.
95. USEPA - *Mobile6 On Road Motor Vehicle Emission Model. 5-Day Training Course*, 2001. Disponível em: <<http://www.epa.gov/otaq/models/mobile6/trng5day/sldday1.pdf>>. Acesso em: 2 de maio de 2014.
96. VASQUES. Brazilian vehicular emission inventory software – BRAVES. *Transport. Res. A: Policy and Practice*, vol. 100, November 2021, 103041. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.103041>.
97. VENTURA, L. M; B., PINTO, F. O. *Inventário Emissões de Fontes Veiculares Região Metropolitana Do Rio De Janeiro*. Instituto Estadual do Ambiente (RJ). Version 1.0. 2013.
98. WALLINGTON, T.J., KAISER, E.W., FARRELL, J.T. Automotive fuels and internal combustion engines: a chemical perspective. *Chem. Soc. Rev.* 35, 335–347. 2006. <https://doi.org/10.1039/b410469m>.
99. WANG, Z., Y. WU, Y. ZHOU, Z. LI, Y. WANG, S. ZHANG, AND J. HAO. Real-world emissions of gasoline passenger cars in Macao and their correlation with driving conditions. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11:1135–46. 2013. doi:10.1007/s13762-013-0276-2.
100. WEIMAR. Statistical analysis of empirical lifetime mileage data for automotive LCA. *Int J Life Cycle Assess.* 2016. 21:215–223. doi:10.1007/s11367-015-1020-6.
101. WILSON, G.; DOS SANTOS, S. P.; CALVETTE, T.; CABRAL, R.; CHAFIM, C.; RIBEIRO, G.; THEES, V. Resultados do teste com o ônibus elétrico na cidade do Rio de Janeiro. Associação Nacional de Transportes Públicos. 2014. Disponível em: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2015/06/12/3381A2D9-7DCF-4960-981F-009AF43DCE92.pdf. Acesso em 24 de out. 2023.

102. WORLD BANK. Green your bus ride – clean buses in Latin America. Washington, D. C. 2019. Disponível em: <http://documents.worldbank.org/curated/>.
103. World Health Organization. Global health risks. *Mortality and burden of disease attributable to selected major risks*. Geneva: World Health Organization. 2009.
104. WRI. World Resources Institute. Os países mais rápidos na transição para carros elétricos. 2023. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/os-paises-mais-rapidos-na-transicao-para-carros-eletricos>. Acesso em 11 de out. 2023.
105. ZACHARIADIS, T., NTZIACHRISTOS, L., & SAMARAS, Z. The effect of age and technological change on motor vehicle emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(3), 221–227. 2001. doi:10.1016/S1361-9209(00)00025-0.
106. ZHAN, T. et al. An analysis of real-world exhaust emission control deterioration in the California light-duty gasoline vehicle fleet. *Atmospheric Environment*, vol. 220, 1 January 2020, 117107. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117107>.
107. ZHANG, Q. et al. The effects of deterioration and technological levels on pollutant emission factors for gasoline light-duty trucks. *Journal of the Air & Waste Management Association*, v. 67, n. 7, p. 814–823, 2017. <https://doi.org/10.1080/10962247.2017.1301275>.
108. ZHANG, Y. et al. Effect of catalyst diesel particulate filter aging and catalyst loadings on particulate emission characteristics from a diesel vehicle. *Journal of Environmental Sciences*, v. 136, p. 35–44, fev. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2022.10.014>.
109. ZHANG, Y. et al. Effect of catalyzed diesel particulate filter and its catalyst loading on emission characteristics of a non-road diesel engine. *Journal of Environmental Sciences*, v. 126, p. 794–805, 1 abr. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.12.028>.

Anexo I: Frota Circulante – sem desconto de sucateamento (SENATRAN)

ANO DE CADASTRO	DIESEL (TOTAL VEÍCULOS)	TODOS OS COMBUSTÍVEIS (TOTAL DE VEÍCULOS)	CAMINHÃO	CAMINHÃO TRATOR	CAMINHONETE	CAMIONETA	MICROÔNIBUS	ÔNIBUS	TRATOR ESTEIRA	TRATOR RODAS
1998	213153	2012825	66712	5900	2013	107691	11041	19563	0	233
1999	276272	2199692	73421	5850	4763	156091	12362	23530	0	255
2000	321237	2410372	78841	5658	16529	181972	14619	23333	1	284
2001	343812	2577117	82266	5943	24019	189805	16878	24609	1	291
2002	366591	2754376	85881	6137	41854	188112	18180	26083	1	343
2003	380605	2894882	87522	6.411	55.791	184.136	20095	26298	1	351
2004	396307	3034980	88950	6368	65201	185950	22204	27279	1	354
2005	413553	3186100	91098	6478	83163	181636	23100	27703	1	374
2006	432664	3186100	93794	7132	99259	179332	23645	29072	1	429
2007	456223	3602571	96315	7763	121441	174355	25188	30714	1	446
2008	484580	3878557	99772	8690	168582	147323	26725	33025	1	462
2009	518781	4158935	103808	9410	183395	158981	27957	34730	1	499
2010	568375	4489680	110468	10780	204251	175470	29689	37174	1	542
2011	627959	4844198	118644	12.226	228.706	196.015	32414	39355	1	598
2012	685081	5212996	126228	13.405	250.999	217.110	34297	42398	1	643
2013	739675	5568514	132959	14.412	274.193	237.294	35834	44316	1	666
2014	792715	5915612	138721	15.271	297.851	257.154	37418	45613	1	686
2015	829357	6184773	142222	15.882	313.063	272.241	38428	46833	1	687
2016	853934	6377484	143509	16.223	324.952	282.937	38550	47077	1	685
2017	870422	6539166	144289	16.285	334.182	291.180	38273	45524	1	688
2018	894169	6725822	144869	16.874	345.912	302.350	38671	44803	1	689
2019	923386	6950941	146171	17.347	360.479	314.316	39797	44572	1	703
2020	941813	7087797	146492	17.752	370.451	322.182	40350	43877	1	708
2021	970792	7296355	147797	19.313	385.269	334.608	40556	42512	1	736
2022	998501	7475503	149762	21.616	395.768	346.967	40959	42667	1	761
2023	1019434	7629819	151757	22.873	403.452	355.199	41274	44114	1	764

Anexo II: Vendas de Diesel (M³) - Agência Nacional de Petróleo (ANP)

Mês	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Jan	181.955	180.273	178.162	172.566	164.022	178.798	186.226	192.332	186.262	199.715	222.319	238.933	237.984	255.284	257.214	221.792	208.660	191.580	200.495	200.800	189.003	188.854	211.330
Fev	157.146	163.668	181.762	160.272	152.886	163.396	173.632	180.592	181.313	200.859	228.418	233.409	213.841	248.165	222.599	224.251	185.747	167.983	188.063	184.010	157.587	183.398	192.518
Mar	185.582	191.438	168.970	186.336	185.809	190.527	203.258	202.966	210.737	231.258	234.916	260.866	246.314	239.800	259.227	251.324	216.650	189.067	187.207	171.515	195.469	204.655	240.635
Abr	172.656	184.803	180.604	177.259	181.635	164.852	186.198	197.526	197.200	211.940	235.750	243.603	248.609	241.006	240.039	223.493	186.874	190.016	193.375	121.933	178.479	196.885	206.655
Mai	180.553	185.360	188.520	169.593	183.630	183.428	193.692	207.755	205.595	225.509	248.257	255.672	256.016	260.968	240.017	225.706	206.472	167.357	204.828	136.169	187.939	211.415	232.783
Jun	183.167	177.192	176.482	175.415	186.243	179.635	190.573	213.425	209.396	227.260	245.018	252.754	242.418	237.236	254.583	221.310	193.072	191.419	187.821	153.457	183.904	201.545	220.992
Jul	182.185	191.104	189.049	177.615	181.027	181.546	200.192	203.838	214.761	231.328	244.429	251.114	252.018	258.190	259.070	229.305	194.256	197.347	207.437	178.694	203.159	210.258	230.974
Agos	195.574	196.986	180.577	181.849	201.861	192.821	211.080	215.099	205.440	236.249	260.144	273.172	269.871	258.432	257.866	226.648	208.118	198.368	203.849	177.794	202.879	227.746	243.499
Set	181.762	184.890	187.172	183.657	193.068	185.287	193.502	218.310	214.950	235.100	249.555	242.590	252.198	265.490	256.968	224.453	200.618	184.763	194.470	179.601	192.874	208.168	
Out	190.474	213.852	191.775	178.627	181.166	187.855	212.397	218.657	220.870	228.229	245.629	266.840	269.815	282.293	268.930	217.765	204.376	212.982	213.351	191.350	194.724	227.525	
Nov	181.438	190.200	171.649	179.891	183.624	184.623	202.421	184.975	211.615	226.065	246.007	246.100	255.034	248.196	244.477	208.191	190.266	192.527	194.892	173.628	189.402	223.108	
Dez	185.487	193.327	189.968	196.182	193.747	192.508	202.653	201.544	224.680	227.841	250.683	247.674	250.055	261.934	255.430	219.062	199.921	196.817	207.552	195.788	203.702	229.373	
Total do																							
Ano	2177979	2253093	2184689	2139262	2188716	2185277	2355824	2437017	2482817	2681353	2911125	3012725	2994174	3056993	3016420	2693299	2395031	2280226	2383340	2064738	2279121	2.512.930	

Anexo III: Intensidade de uso de veículos a diesel em km/ano

Ano	Anos de uso	Comerciais Leves Diesel	Ônibus Urbanos	Ônibus Rodoviários	Micro-Ônibus	Caminhões Semileves	Caminhões Leves	Caminhões Médios	Caminhões Semi-pesados	Caminhões Pesados	Total	Média da Intensidade de uso (Km/ano)
Grupo		1	2	3				4				
2017	0	14.221	31.235	31.235	17.789	20.542	20.542	20.542	28.112	28.112	212.328	36.101
2016	1	28.443	62.470	62.470	35.578	41.083	41.083	41.083	56.223	56.223	424.657	73.019
2015	2	27.358	58.979	58.979	31.654	38.117	38.117	38.117	55.200	55.200	401.719	70.466
2014	3	26.321	55.908	55.908	29.359	35.564	35.564	35.564	54.176	54.176	382.540	68.208
2013	4	25.270	53.205	53.205	27.730	33.386	33.386	33.386	53.152	53.152	365.871	66.514
2012	5	24.142	50.816	50.816	26.467	31.543	31.543	31.543	52.129	52.129	351.129	64.835
2011	6	22.874	48.689	48.689	25.435	30.002	30.002	30.002	51.105	51.105	337.901	63.129
2010	7	21.406	46.769	46.769	24.562	28.726	28.726	28.726	50.081	50.081	325.846	61.630
2009	8	19.673	45.004	45.004	23.806	27.684	27.684	27.684	49.057	49.057	314.654	60.004
2008	9	17.614	43.341	43.341	23.140	26.846	26.846	26.846	48.034	48.034	304.040	58.364
2007	10	15.950	41.727	41.727	22.543	26.182	26.182	26.182	47.010	47.010	294.512	56.741
2006	11	15.950	40.108	40.108	22.004	25.666	25.666	25.666	45.986	45.986	287.141	56.446
2005	12	15.950	38.432	38.432	21.511	25.274	25.274	25.274	44.963	44.963	280.071	55.821
2004	13	15.950	36.644	36.644	21.058	24.982	24.982	24.982	43.939	43.939	273.119	55.640
2003	14	15.950	34.693	34.693	20.638	24.768	24.768	24.768	42.915	42.915	266.111	55.608
2002	15	15.950	32.525	32.525	18.680	24.615	24.615	24.615	41.892	41.892	257.309	55.274
2001	16	15.950	30.709	30.709	18.680	24.504	24.504	24.504	40.868	40.868	251.297	55.195
2000	17	15.950	29.329	29.329	18.680	24.420	24.420	24.420	39.844	39.844	246.235	55.334
1999	18	15.950	28.010	28.010	18.680	24.348	24.348	24.348	38.820	38.820	241.337	58.269
1998	19	15.950	26.751	26.751	18.680	24.278	24.278	24.278	37.797	37.797	236.560	64.812

Fonte: adaptado de CETESB (2017).

Anexo IV – Autonomia de veículos a diesel

Ano		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Fase Proconve		P2/P3/P4	P2/P3/P4	P2/P3/P4	P3/P4	P3/P4	P4	P4	P4/P5	P4/P5	P4/P5	P4/P5	P5	P5	P5
Categoria		Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)
Caminhões	Semileves	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
Caminhões	Leves	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Caminhões	Médios	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Caminhões	Semipesados	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Caminhões	Pesados	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Ônibus	Urbanos	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Ônibus	Microônibus										3,4	3,4	3,4	3,4	3,4
Ônibus	Rodoviários	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2

Ano		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Fase Proconve		P5	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7	P7/P8	P8
Categoria		Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)	Autonomia (km/l)
Caminhões	Semileves	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1	9,1
Caminhões	Leves	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6	5,6
Caminhões	Médios	5,6	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8	5,8
Caminhões	Semipesados	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Caminhões	Pesados	3,4	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Ônibus	Urbanos	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1
Ônibus	Micro-ônibus	3,4	3,4	3,4	3,4	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3
Ônibus	Rodoviários	3,2	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4	3,4

Fonte: CETSB (2023).

Anexo V – Fatores de emissão de MP e CO₂ e Taxa de depreciação do motor

Fatores de Emissões de Material Particulado M₁₀ (MP)

Combustível	0,0200	g/km
Freio	0,5900	g/km
Pneus e Pistas	0,0380	g/km

Fatores de Emissões de dióxido de carbono (CO₂)

Combustível	Densidade. (kg/m ³)	Fator de emissão [kg/l]
Diesel	840	2,603
Biodiesel	880	2,431

Anexo VI – Fatores de emissão de MP e CO₂ e Taxa de depreciação do motor

Taxa de depreciação de 5% a.a (CLARK et al, 2022)												
Ano de fabricação	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Taxa de depreciação acumulada	1,9253	1,7860	1,6533	1,5270	1,4066	1,2920	1,1829	1,0789	0,9799	0,8856	0,7959	0,7103
Ano de fabricação	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	
Taxa de depreciação acumulada	0,6289	0,5513	0,4775	0,4071	0,3401	0,2763	0,2155	0,1576	0,1025	0,0500	0,0000	

Nota: a taxa de desgaste pode ser modificada de acordo com a tecnologia do motor.