

INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA



MAUÁ

Avaliação do impacto de renovação de frota de caminhões em eficiência energética e emissões gasosas

Novembro de 2025

Gustavo Cassares Pires
Sandro Guimarães Souza
Fábio da Silva
Clayton Barcelos Zabeu

Divisão de Motores e Veículos - Centro de Pesquisas
Instituto Mauá de Tecnologia

RESUMO

A participação do Brasil nas discussões internacionais sobre mudanças climáticas é expressiva, bem como seus compromissos firmados como signatário do “Acordo de Paris”. Em 2024, foi firmado um compromisso de reduzir as emissões 59% a 67% em 2035, almejando atingir a neutralidade de carbono até 2050 (EPE, 2025). Ainda em 2025 o Brasil sediará a “COP 30” (Conferência das Partes), sendo a reunião de países signatários da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC), e tem como objetivo discutir questões relacionadas ao aquecimento global e às mudanças climáticas. Com o intuito de contribuir com as discussões relevantes do evento, este estudo se propõe a criar uma metodologia para mensurar o potencial de redução de emissão de gases de escapamento por meio da renovação de frota de caminhões brasileira. Tal metodologia contempla, primeiramente, a estimativa da frota circulante de caminhões no ano-calendário de 2023 baseando-se em dados de domínio público, com premissas de taxa de sucateamento. A seguir, calculam-se as quantidades de poluentes e de gases de efeito estufa emitidos pelo sistema de exaustão desses veículos circulantes segregando-se seus anos de fabricação e fases do Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), empregando-se os fatores de emissão e intensidades de uso típicos dos veículos. Como resultado, obtêm-se curvas de emissão de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), hidrocarbonetos não queimados (HC), material particulado (MP) e dióxido de carbono equivalente (CO_{2eqv}) na atmosfera para cada segmento da frota. Posteriormente, foram simulados cenários de renovação de frota para avaliação do impacto de políticas públicas hipotéticas. Como resultados importantes destacaram-se os impactos na emissão de poluentes e de GEE nos diferentes cenários de substituições de frotas, variando-se de 25,2 a 82,5% a redução em CO, 40,0 a 84,5% de HC, 22,4 a 77,8% NO_x, 47,0 a 89,9% de MP e 3,4 a 11,0% de redução de GEE caso fosse possível substituir todos os veículos com mais de 10 e mais de 20 anos de idade.

Cenário	CO	HC	CH ₄	NO _x	MP	CO _{2eqv}
10 anos	82,5%	84,5%	56,1%	77,8%	89,9%	11,0%
<P7 (12 anos)	78,8%	84,3%	44,0%	72,6%	87,9%	9,5%
20 anos	25,2%	40,0%	10,0%	22,4%	47,0%	3,4%

Palavras-chave: emissões de poluentes, renovação de frota, veículos pesados.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEA – Associação Brasileira de Engenharia Automotiva
ANFAVEA – Associação Nacional de Fabricantes de Veículos Automotores
ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
B10 – Mistura de diesel A com 10% de biodiesel
B12 – Mistura de diesel A com 12% de biodiesel
B100 – Biodiesel 100%
CCU – Capacidade de carga média útil
CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH₄ – Metano
CO – Monóxido de carbono
CO₂ – Dióxido de carbono
CO_{2eqv} – Dióxido de carbono equivalente para fins de potencial de aquecimento
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito
EPE – Empresa de Pesquisa Energética
FGV – Fundação Getúlio Vargas
GEE – Gases de efeito estufa
GHG – *Green House Gases* – gases de efeito estufa
GNV – Gás natural veicular
HC – Hidrocarbonetos
IEA – *International Energy Agency*
MMA – Ministério do Meio Ambiente
MME – Ministério das Minas e Energia
MP – Material particulado
NO – Monóxido de nitrogênio
NO₂ – Dióxido de nitrogênio
NO_x – Óxidos de nitrogênio (NO e NO₂)
N₂O – Óxido nitroso
O₂ – Oxigênio
PROCONVE – Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores.
SENATRAN – Secretaria Nacional de Trânsito
SERPRO – Serviço Federal de Processamento de Dados
SINDIPEÇAS – Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores.
UHC – *Unburned hydrocarbons* – Hidrocarbonetos não queimados
UNFCCC – *United Nations Framework Convention on Climate Change*
tku – Tonelada-quilômetro útil

SUMÁRIO

1	Introdução	5
2	Metodologia	9
2.1	Fontes de dados	9
2.1.1	Frota circulante	9
2.1.2	Composição e proporção da frota	10
2.1.3	Fatores de emissão	10
2.1.4	Intensidade de uso de veículos pesados	11
2.1.5	Eficiência energética de veículos pesados	11
2.1.6	Capacidade de carga útil de veículos pesados	11
2.1.7	Estimativa de emissão de CO _{2eqv} de veículos pesados	12
2.2	Cálculos empregados	13
2.2.1	Distância percorrida	13
2.2.2	Consumo de combustível	14
2.2.3	Emissões de CO _{2eqv}	14
2.2.4	Emissões de poluentes	15
2.2.5	Emissões de CO _{2eqv} relacionadas à distância percorrida e carga útil	15
2.3	Renovação da frota	15
3	Resultados	17
3.1	Frota circulante	17
3.2	Emissões de poluentes regulamentados e de GEE	18
3.3	Perfil da frota e evolução da emissão específica de CO _{2eqv}	23
3.4	Cenários hipotéticos de renovação de frota	25
3.4.1	Renovação de veículos anteriores à fase P7	26
3.4.2	Renovação de veículos com mais de 10 e 20 anos de idade	27
4	Conclusões e considerações adicionais	28
5	Bibliografia	30
	Anexo A – Valores de frota circulante em 2023	32
	Anexo B – Composição da frota circulante em 2023	33
	Anexo C – Fatores de emissão ponderados	34
	Anexo D – Intensidades de uso ponderadas	35
	Anexo E – Eficiências energéticas ponderadas	36
	Anexo F – Capacidades de carga útil ponderadas	37

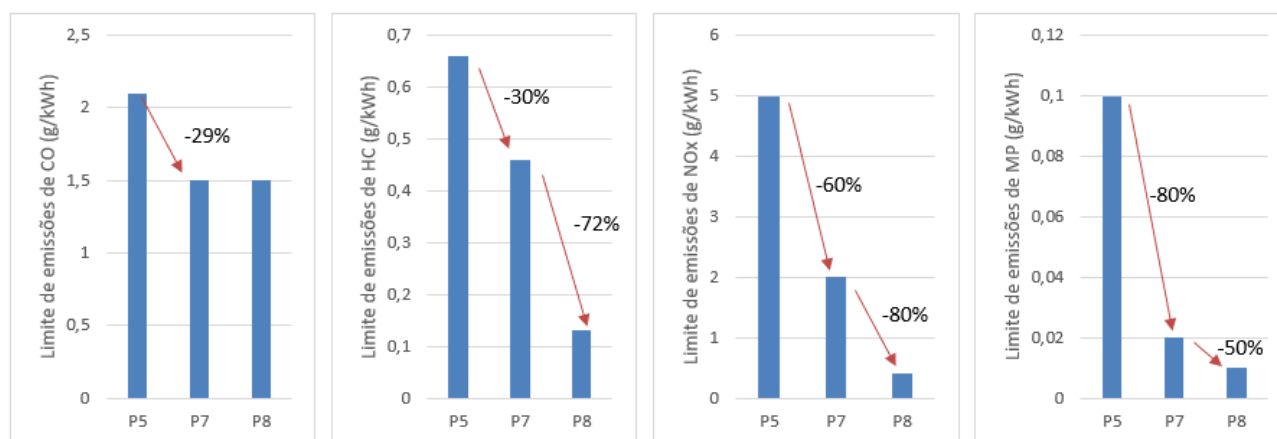
1 Introdução

Diante do contínuo esforço do setor de transportes na busca da redução de emissões de poluentes tóxicos ao ser humano e gases causadores de efeito-estufa (GEE), a indústria automotiva desenvolve e aplica periodicamente novas tecnologias aos motores e veículos comercializados no mundo. Esse setor é um dos principais contribuidores dessas emissões, principalmente de CO₂ relacionadas à energia (EPE, 2025). Apesar da relevância dessas novas tecnologias em relação às emissões de poluentes e desempenho, a frota nacional circulante ainda contém quantidade expressiva de veículos antigos e, muitas vezes, obsoletos, cuja contribuição nas emissões de GEE é de determinação complexa.

O Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE - criado em 1986 por meio da Resolução CONAMA 18/1986 (Ministério do Meio Ambiente, 1986), tem imposto a regulação da emissão de poluentes e, desde sua criação, houve grande evolução nos critérios e controles para diferentes aplicações. Particularmente para veículos pesados, o controle de emissões gasosas pelo escapamento teve início em 1993, com introdução gradativa dos limites da Fase P-3 (1994), P-4 (1998), P-5 (2004), P-6 adiada para P7 (2012) até a atual P8. A Figura 1.1 mostra a evolução dos limites de emissão de poluentes dos motores aplicados em veículos pesados desde o início em 1993, dando ênfase nas reduções que foram impostas a partir da fase P5 (correspondente à EURO III).

Figura 1.1 – Limites de emissões regulamentados.

PROCONVE	EURO	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NOx [g/kWh]	MP [g/kWh]	Norma (Conama)	Vigência	Teor de enxofre (S) [ppm]
P1	-	14	3,5	18	-	Res. 18/85	1989 a 1993	-
P2	Euro 0	11,2	2,45	14,4	-	Res. 08/93	1994 a 1995	3000 a 10000
P3	Euro 1	4,9	1,23	9	0.40 ou 0.70	Res. 08/93	1996 a 1999	3000 a 10000
P4	Euro 2	4	1,1	7	0,15	Res. 08/93	2000 a 2005	3000 a 10000
P5	Euro 3	2,1	0,66	5	0,1	Res. 315/02	2006 a 2011	500 a 2000
P7	Euro 5	1,5	0,46	2	0,02	Res. 403/08	2012 a 2022	10
P8	Euro 6	1,5	0,13	0,4	0,01	Res. 490/18	a partir de 2023	10

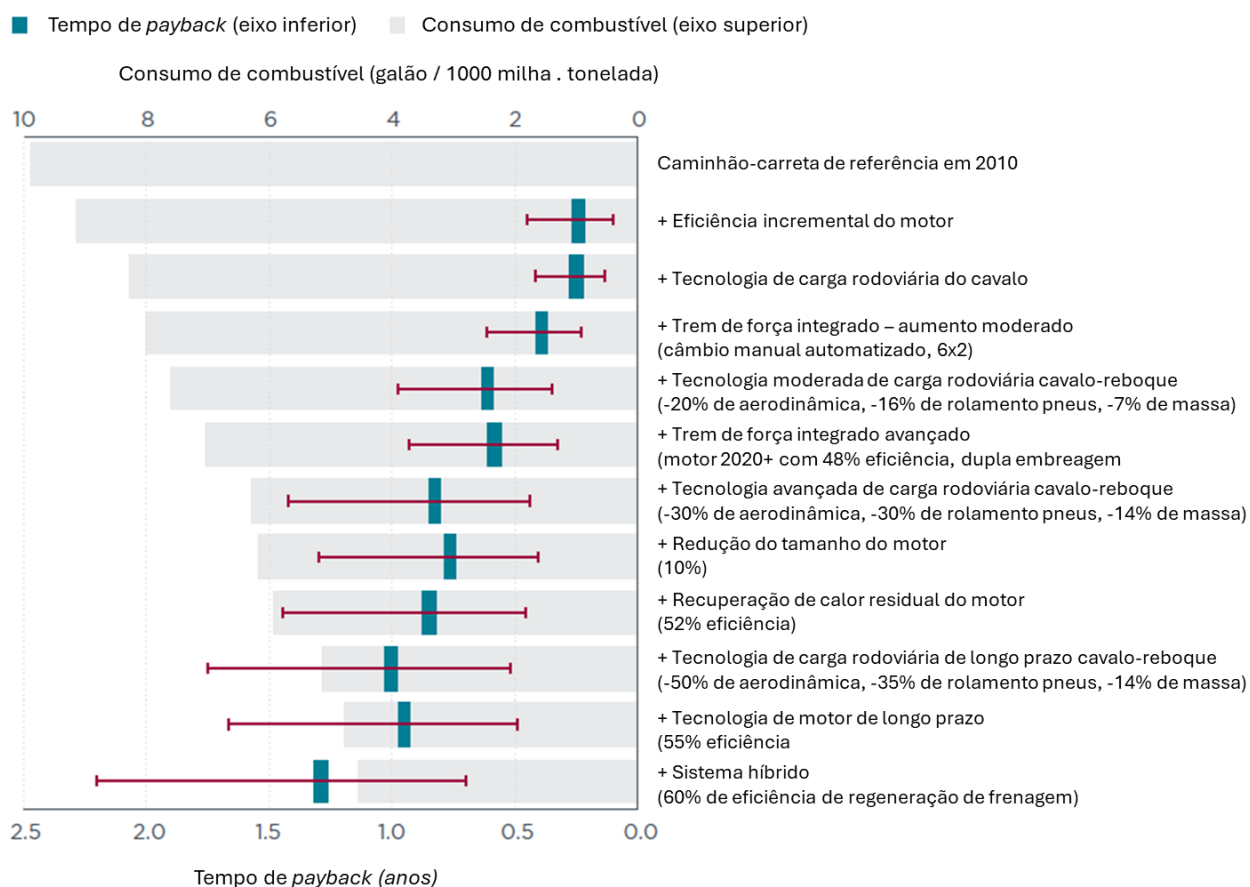


Fonte: adaptado do PROCONVE.

Embora sejam notáveis as reduções de emissões impostas, é complexo se determinar qual o impacto que tais reduções causaram na poluição atmosférica sem que se estime a quais parcelas da frota circulante são oriundas de cada fase do PROCONVE.

Associada à redução de emissões de poluentes ocasionadas pelo PROCONVE, tem-se observado um aumento da eficiência energética no transporte de cargas. A melhoria da eficiência global de transporte é consequência de diversos fatores tais como a aplicação de novas tecnologias no projeto e manufatura dos caminhões, de seus motores e de seus implementos – como utilização de materiais mais leves e avanço de soluções aerodinâmicas, bem como o desenvolvimento de sistemas de controle e mudanças estratégicas de logística no transporte de carga. Como exemplo dos potenciais ganhos de eficiência, a Figura 1.2 mostra uma estimativa de como cada tecnologia (motor, arrasto aerodinâmico, pneus etc.) pode contribuir com a redução no consumo de combustível por 1000 milhas por tonelada de carga útil).

Figura 1.2 – Estimativa dos impactos no consumo de combustível e períodos de retorno associados para um conjunto cavalo-reboque no período 2015-2025.

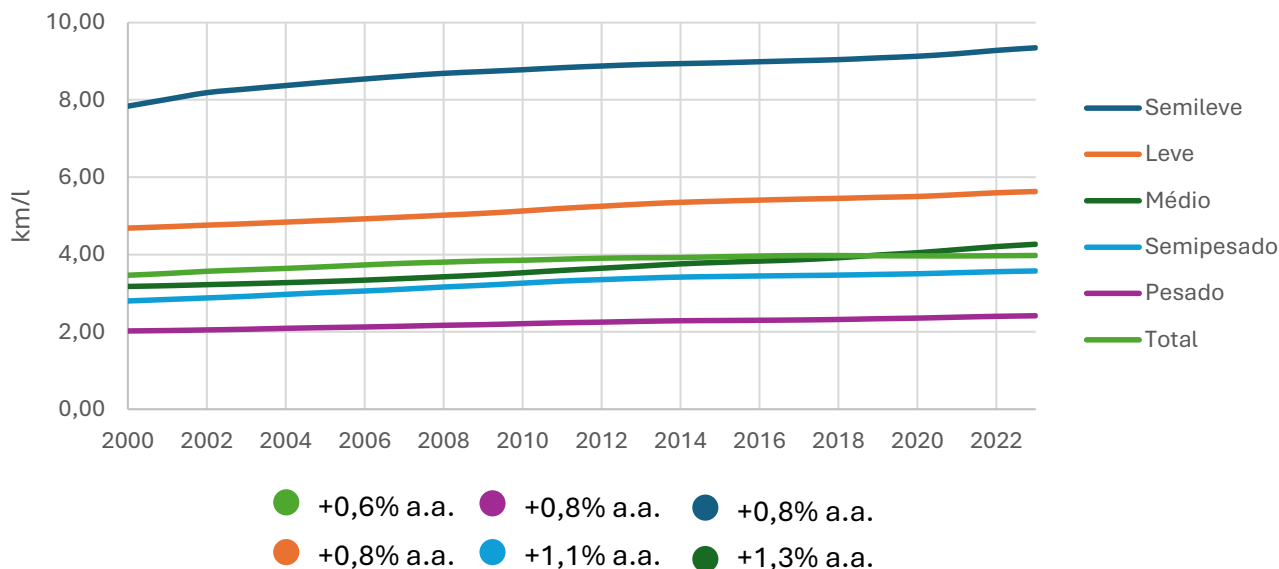


Fonte: adaptado de (Meszler, Lutsey, & Delgado, 2015).

Para a situação brasileira, a Empresa de Pesquisas Energéticas levantou o aumento da autonomia das diversas categorias dos veículos de transporte entre 2000 e 2023, publicado

em seu Atlas de Eficiência Energética de 2024 (EPE, 2024). A Figura 1.3 indica um aumento na autonomia entre 0,6 até 1,3% ao ano, dependendo da categoria de veículo analisada.

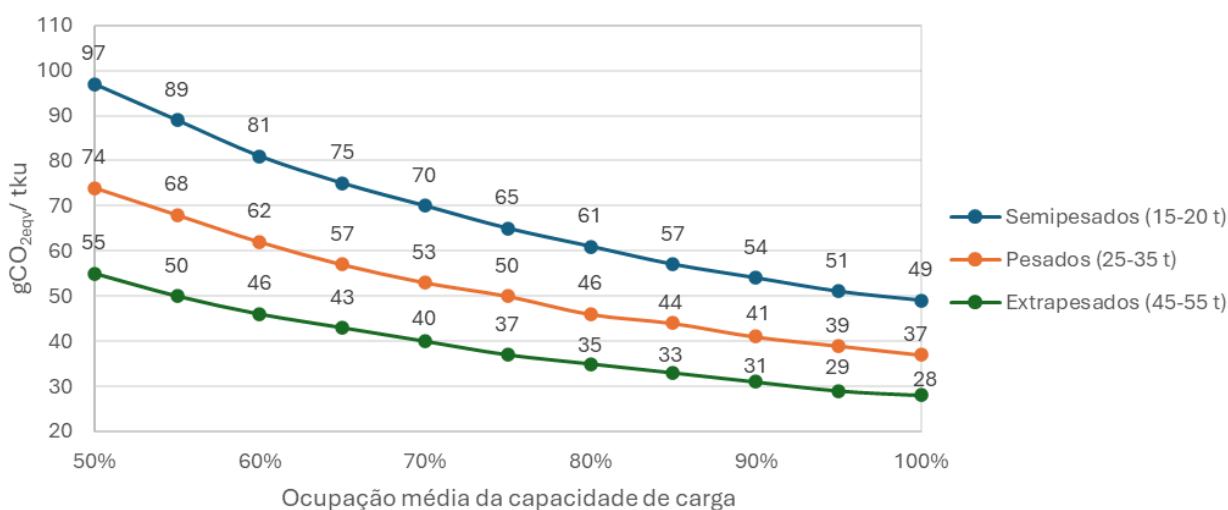
Figura 1.3 – Evolução da autonomia de veículos de carga novos no período 2000-2023.



Fonte: adaptado de (EPE, 2024).

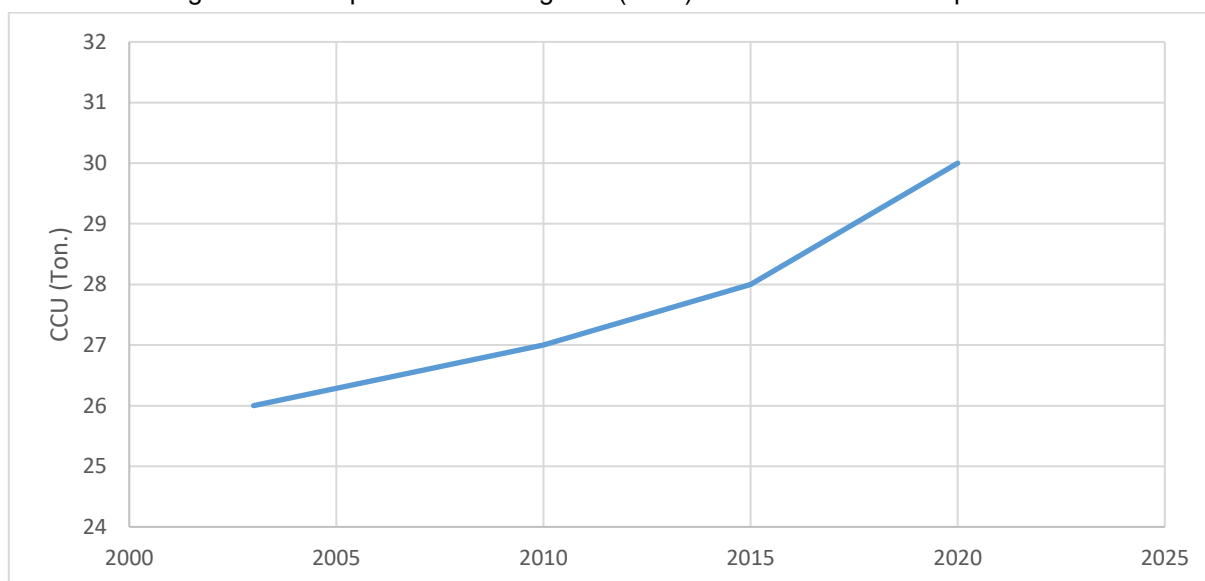
Segundo Branco *et al.* (Branco, Bartholomeu, Nocera, & Caixeta, 2023), no aspecto logística de transporte, a otimização estratégica viabiliza uso de veículos com maior capacidade de carga, que tendem a reduzir a emissão de CO_{2eqv}/tku, conforme exibido no gráfico da Figura 1.4. Concomitantemente, houve registro do aumento da capacidade de carga útil de veículos pesados publicado no relatório Transporte Rodoviário de Cargas no Brasil (MME; EPE; IEA, 2021), como indicado na Figura 1.5.

Figura 1.4 – Emissões de CO_{2eqv} por capacidade de carga útil.



Fonte: adaptado de (Branco, Bartholomeu, Nocera, & Caixeta, 2023).

Figura 1.5 – Capacidade de carga útil (CCU) média de caminhões pesados.



Fonte: adaptado de (MME; EPE; IEA, 2021).

O presente estudo propõe a criação de uma metodologia que permita avaliar o impacto das emissões de escapamento de caminhões discretizadas por ano de fabricação na frota circulante de 2023, baseando-se em dados de domínio público (EPE, AEA, CETESB, ANFAVEA etc.).

Após uma descrição da metodologia empregada neste estudo, são mostrados fatores importantes para a compreensão do desenvolvimento, processamento e resultados obtidos. A frota circulante em 2023 com sua capacidade de carga e intensidade de uso, bem como a eficiência de transporte são levados em consideração nos cálculos preditivos de emissões de poluentes e de GEE. Por fim, diferentes cenários de substituição de veículos antigos foram simulados a fim de se compreender a sensibilidade da idade da frota no escopo de renovação que geraria resultados eficazes em termos de emissões de escapamento. Para esse fim, foi considerado um primeiro cenário de substituição da frota anterior à fase PROCONVE P7, que dado o ano de referência abordado teria 12 anos de idade, um segundo cenário que considerou substituição de veículos com mais de 10 anos em uso e um terceiro cenário que abordou veículos com mais de 20 anos.

As contribuições para emissões na renovação de frota a serem detalhadas a seguir não consideraram benefícios indiretos como: melhoria na segurança veicular, menor número de ocorrências de bloqueio nas pistas levando a trânsito desnecessário e potencial da reciclagem como redutor de matéria-prima virgem.

2 Metodologia

Com o intuito de compreender como frotas antigas ainda circulantes em 2023¹ impactam as emissões de gases poluentes e de GEE, foram levantados dados de inventários e relatórios que permitissem cruzar informações como emplacamento, taxa de sucateamento, consumo de combustível por categoria, capacidade de carga, bem como distâncias médias percorridas por cada veículo dependendo da sua idade. Uma vez que os fatores de intensidade de uso, emissões de poluentes, eficiência energética e capacidade de carga são dependentes da classificação dos veículos (leves, semileves, médios, semipesados e pesados), as médias foram ponderadas de acordo com proporções entre as categorias de cada ano, relatadas no anuário Anfavea de 2024 (ANFAVEA, 2024). Após a obtenção do consumo de combustível total por ano de fabricação dos veículos circulantes em 2023, foi possível traçar um panorama dos GEE com base na ferramenta de cálculo *GHG Protocol* - cálculo de GEE - (FGV, 2025).

Devido à escassez de documentos de domínio público atualizados sobre estimativas de emissões de poluentes em escala nacional, foi necessário escrutinar e, algumas vezes, tornar constantes ou ponderar os dados mais recentes sobre diversos fatores de cálculo, por exemplo fatores de emissões, índice de intensidade de uso, consumo de combustível etc. As fontes usadas e cálculos realizados estão descritos de maneira mais detalhada a seguir. Vale ressaltar que toda decisão implementada utilizou de critérios conservadores, mesmo cientes de que isso diminuísse o potencial real da renovação da frota analisada.

2.1 Fontes de dados

O presente estudo considerou somente dados disponíveis em bases públicas, não tendo sido parte do trabalho levantamento experimental ou privado de outras fontes de informação. São indicadas a seguir as origens de tais fontes.

2.1.1 Frota circulante

Os valores de frota circulante nacional foram extraídos do “Relatório Anual de Frota Circulante” do SINDIPEÇAS - edição 2024 (SINDIPEÇAS, 2024). O cálculo do SINDIPEÇAS é consistente e feito com base em dados de emplacamento mensal de veículos publicado pelo SENATRAN (SERPRO) e índice de sucateamento veicular com

¹ 2023 foi empregado como ano de referência para este estudo em função da disponibilidade de dados na época de sua elaboração

modelo próprio, que por sua vez são fundamentados em dados de seguradoras e vida média de veículos.

Os valores empregados nesse trabalho estão listados no “Anexo A – Valores de frota circulante”.

2.1.2 Composição e proporção da frota

Buscando-se definir as proporções de caminhões semileves, leves, médios, semipesados e pesados na frota, foram levantados os números de emplacamentos de veículos de cada ano de acordo com o anuário (ANFAVEA, 2024). As frações de cada categoria foram então aplicadas nos cálculos de ponderação que serão descritos a seguir. Devido à falta de detalhamento dos dados anteriores a 2002, os valores mais antigos disponíveis foram considerados constantes para os anos pregressos.

Os valores utilizados nessa etapa estão listados no “Anexo B – Composição da frota circulante em 2023”.

2.1.3 Fatores de emissão

Os fatores de emissão atmosférica de CO, HC, CH₄, NO_x e material particulado foram os mesmos publicados no relatório de emissões veiculares no Estado de São Paulo de 2023 (CETESB, 2023). Tais fatores foram obtidos durante o processo de pesquisa e homologação no âmbito do PROCONVE. Devido à falta de detalhamento dos dados anteriores a 1999, os valores mais antigos disponíveis foram considerados constantes para os anos pregressos. Deve-se ressaltar que esses fatores de emissão, por terem sido levantados durante o processo de homologação dos veículos, retratam uma realidade de “veículo novo”, e que não necessariamente irão se perpetuar ao longo da vida dos veículos. Ao se adotarem fatores de emissão constantes – ou seja, fatores de emissão que não se deterioraram com a vida dos veículos – é de se esperar que os valores reais de emissão de GEE e de poluentes devam ser maiores do que os estimados aqui.

Com o intuito de se estudar a frota – e não uma categoria de veículo – foi criado o conceito de “veículo médio”. Esse veículo médio é representado pela média ponderada de veículos das diversas categorias circulantes na frota de um determinado ano.

Os valores utilizados nessa etapa estão listados no “Anexo C – Fatores de emissão ponderados”.

2.1.4 Intensidade de uso de veículos pesados

A intensidade de uso, considerada no cálculo de distância percorrida pelos veículos de cada ano dentro da frota circulante, foi extraída do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (MMA, 2013). Não foram encontradas fontes de dados mais atuais com abrangência nacional e nível de separação por tipo de veículo equivalentes ao inventário. Recomenda-se que o poder público considere definir uma análise frequente dessa informação para que seja possível orientar de maneira efetiva políticas públicas.

Os valores calculados nessa fase estão listados no “Anexo D – Intensidades de uso ponderadas”.

2.1.5 Eficiência energética de veículos pesados

Para se determinar o consumo de combustível por quilômetro rodado de um “veículo médio” da frota (km/l), uma ponderação da frota considerando-se as diversas classes (semileves, leves, médios, pesados) foi realizada a partir dos valores presentes no Atlas da Eficiência Energética (EPE, 2024). Devido à falta de detalhamento dos dados anteriores a 2000, os valores mais antigos disponíveis foram considerados constantes para os anos progressos.

Os valores calculados nessa fase estão listados no “Anexo E – Eficiências energéticas ponderadas”.

2.1.6 Capacidade de carga útil de veículos pesados

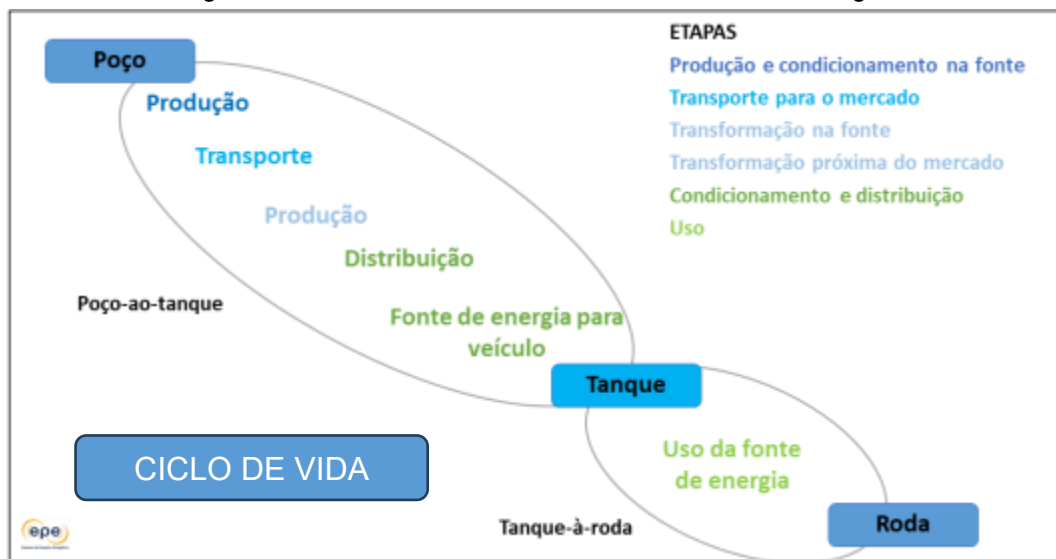
A fim de se mensurar o aumento da eficiência dos veículos pesados em termos de emissão de CO_{2eqv} por carga e distância percorrida e de se criar cenários hipotéticos de renovação de frota, foi necessário relacionar o gasto energético com a capacidade de carga da frota. Como consequência da carência de dados públicos disponíveis que registrem as quantidades relacionadas aos modelos dos veículos circulantes, um levantamento do catálogo de veículos comercializados atualmente foi realizado pelos autores, e a capacidade de carga útil foi resultado de uma média simples, separada pela classificação dos caminhões, da subtração do peso bruto total legal e da tara do veículo.

Os valores calculados nessa fase estão listados no “Anexo E – Eficiências energéticas ponderadas”.

2.1.7 Estimativa de emissão de CO_{2eqv} de veículos pesados

O escopo do presente estudo delimita-se ao cálculo da intensidade de carbono das fontes de energia de motores de combustão interna, tendo como referência o conceito do “poço-à-roda”, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Ciclo de vida do carbono das fontes de energia.

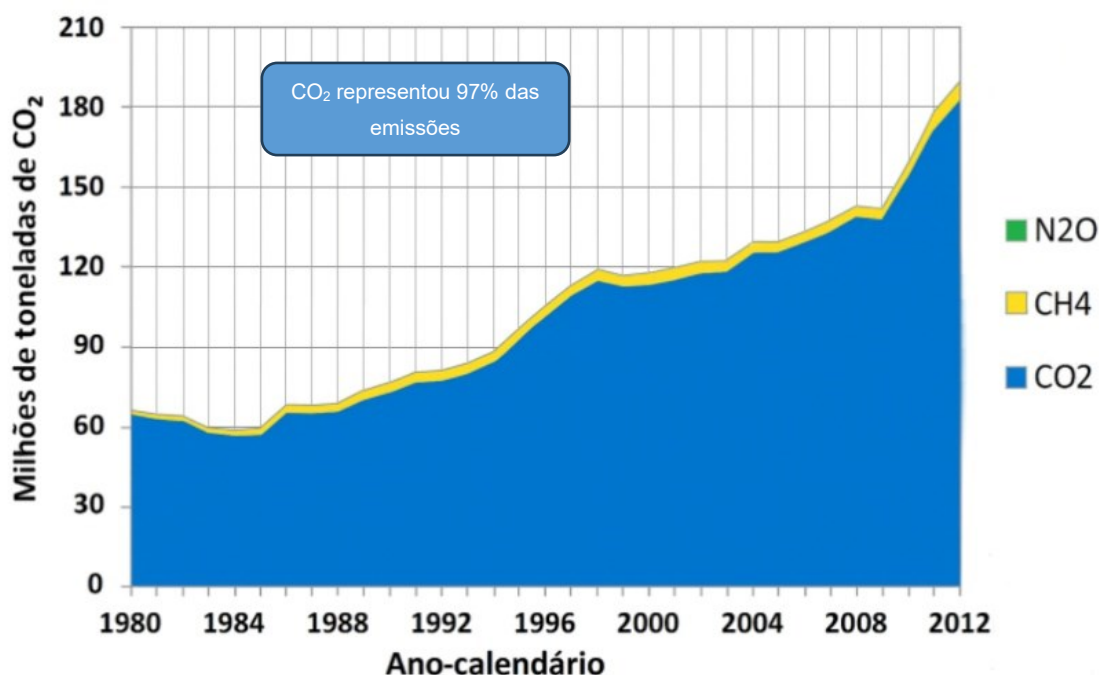


Fonte: adaptado de (EPE, 2022).

Para cálculo da emissão de CO₂ e CO_{2eqv} (em toneladas), foi utilizada a ferramenta de cálculo do Programa Brasileiro *GHG Protocol*, tendo como base o volume de combustível estimado através da aplicação dos outros fatores supracitados. O tipo de veículo selecionado na ferramenta foi o que representa a média da classificação calculada.

De uma forma geral, a contribuição mais significativa para o cálculo do CO_{2eqv} vem do próprio CO₂ bruto, conforme ilustrado na Figura 2.2, onde mostra as emissões de CO_{2eqv}, segregadas por gás de efeito estufa, onde o CO₂ bruto teve uma participação de 97% nas emissões (MMA, 2013). Essa observação é pertinente com o fato de que os produtos da combustão completa são CO₂ e H₂O, ou seja, as emissões de CO₂ seguem majoritariamente o consumo de combustível, de forma que o aumento do rendimento do motor ao longo do tempo é responsável pela redução de consumo de combustível e, adicionalmente, o avanço nos sistemas de pós-tratamento que resultaram em redução massiva de gases nocivos à saúde humana geram impacto menos relevante em termos de GEE.

Figura 2.2 – Emissões de gases de efeito estufa.



Fonte: adaptado de (MMA, 2013).

Importante mencionar que se definiu como o combustível da frota em 2023 como sendo a média ponderada do teor de biodiesel utilizado naquele ano (B10 até março e B12 a partir de abril). Assim, a evolução do teor de biodiesel não está apresentando diferença, pois os veículos foram todos comparados com uso em 2023. A quantidade ainda inicial de veículos que utilizam GNV, Biometano ou B100 não estão representados nesse estudo. Esse é outro fator não considerado que o modelo desse trabalho usa para definir a renovação de frota, isto é, foi considerada que a renovação acontece sempre com um novo veículo diesel.

2.2 Cálculos empregados

A partir dos dados listados nos capítulos anteriores, foram calculadas – em 2023 – as distâncias totais percorridas, os volumes de combustível consumidos, as emissões totais de poluentes e gases de efeito estufa. Os capítulos a seguir detalham os cálculos empregados.

2.2.1 Distância percorrida

O cálculo da distância percorrida pelos veículos médios de cada ano de fabricação na frota 2023 foi realizado por meio da equação 1:

$$D_a = Q_{va} \cdot I_{va} \quad \text{eq. (1)}$$

onde:

D_a : distância total percorrida pelos veículos fabricados no ano a ;

Q_{Va} : quantidade de veículos fabricados no ano a (Anexo A – Valores de frota circulante em 2023);

I_{Ua} : intensidade de uso ponderada baseada no veículo médio fabricado no ano a (ponderada por classificação - Anexo D – Intensidades de uso ponderadas).

2.2.2 Consumo de combustível

O consumo de combustível, posteriormente usado como dado de entrada para a ferramenta *GHG protocol*, foi estimado de acordo com a equação 2:

$$Cons_a = D_a \cdot Ec_a \quad \text{eq. (2)}$$

onde:

$Cons_a$: consumo de combustível pelos veículos fabricados no ano a ;

Ec_a : eficiência energética dos veículos fabricados no ano a (ponderada por classificação - Anexo E – Eficiências energéticas ponderadas).

2.2.3 Emissões de CO₂eqv

As emissões totais de CO₂eqv são calculadas com base no protocolo GHG (planilha eletrônica disponibilizada pela FGV - ferramenta_ghg_protocol_v2025.0.1.xlsx), em função da quantidade total de combustível utilizado, levando-se em consideração os efeitos de potencial de aquecimento global não só do CO₂, mas como também do CH₄ e N₂O oriundos da combustão de um motor diesel, com os fatores de emissão indicados na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Fatores de emissão de Diesel A e B100 – GHG Protocol.

3.1 Fatores para combustão móvel
Fator de emissão por tipo de combustível

Tabela 3. Fatores de emissão por utilização de combustíveis fósseis em fontes móveis

Combustível	Unidade	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Densidade (kg/unidade)	Referência	Fatores de Emissão (kg GEE/un.)		
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gasolina Automotiva (pura)	litros	10.400	0.742	BEN 2023	2.212	0.0028	0.00036
Óleo Diesel (puro)	litros	10.100	0,840	BEN 2023	2,603	0,0001385	0,0001385
Gas Natural Veicular (GNV)	m ³	8.200	-	BEN 2023	1.999	0.0034	0.00011
Gas Natural Liquefeito (GNL)	litros	10.898	0.452	DEFRA 2024	1.170	0.0019	0.00006
Gas Liquefeito de Petróleo (GLP)	kg	11.100	-	BEN 2023	2.932	0.0029	0.00001
Querosene de Aviação	litros	10.400	0.799	BEN 2023	2.517	0.0000	0.00007
Gasolina de Aviação	litros	10.600	0.726	BEN 2023	2.251	0.0000	0.00006
Lubrificantes	litros	10.120	0.875	BEN 2023	2.718	0.0001	0.00014
Metano	litros	4.761	0.793	DEFRA 2024	1.089	0.0001	0.00001
Óleo Combustível	litros	9.590	1.000	BEN 2023	3.106	0.0004	0.00002

Tabela 4. Fatores de emissão por utilização biocombustível em fontes móveis

Combustível	Unidade	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Densidade (kg/unidade)	Referência	Fatores de Emissão (kg GEE/un.)		
					CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Etanol Hidratado	litros	6.300	0.809	BEN 2023	1.457	0.0004	0.00001
Biodiesel (B100)	litros	9.000	0,880	BEN 2023	2,431	0,0003	0,00002
Biometano	m ³	8.485	-	DEFRA 2024	1.993	0.0033	0.00011
Bioquerosene (SAF)	litros	10.516	0.791	DEFRA 2024	2.491	0.0000	0.00009
kHVO (diesel verde)	litros	10.509	0.780	DEFRA 2024	2.431	0.0000	0.00013
Biometano	litros	4.761	0.793	DEFRA 2024	1.089	0.0001	0.00001
Etanol Anidro	litros	6.750	0.791	BEN 2023	1.526	0.0002	0.00001

Fonte: adaptado de GHG ferramenta_ghg_protocol_v2025.0.1.xlsx (FGV, 2025).

Foram, para efeito de cálculo, considerados os teores de biodiesel presentes no ano de 2023 (10 a 12%). A equação 3 indica o cálculo da emissão total de CO₂eqv.

$$E_{CO_{2e},a} = f(Cons_a)GHGprotocol \quad \text{eq. (3)}$$

onde:

$E_{CO_{2e},a}$: emissão total de CO_{2eqv} dos veículos fabricados no ano a através do protocolo GHG.

2.2.4 Emissões de poluentes

As emissões anuais de CO, NO_x, CH₄ e HC e MP foram calculadas de acordo com a equação 4:

$$E_{a,i} = D_a \cdot Fe_a \quad \text{eq. (4)}$$

onde:

$E_{a,i}$: emissão total do poluente i pelos veículos fabricados no ano a ;

$Fe_{a,i}$: fator de emissão ponderado do poluente i baseado no veículo médio fabricado no ano a (ponderado por classificação - Anexo C – Fatores de emissão ponderados).

Substituindo a equação 1 na equação 4, chega-se à equação 5, que relaciona a emissão de cada poluente:

$$E_{a,i} = Q_{Va} \cdot I_{Ua} \cdot Fe_{a,i} \quad \text{eq. (5)}$$

2.2.5 Emissões de CO_{2eqv} relacionadas à distância percorrida e carga útil

Para quantificação da massa de CO_{2eqv} emitida por um veículo de carga ($m_{CO_{2eqv} \text{ normalizada}}$), normalizada pela carga transportada e pela distância percorrida, foi empregada a equação 6, cuja unidade será expressa em $\frac{gCO_{2eqv}}{\text{ton útil.km}}$:

$$m_{CO_{2eqv} \text{ normalizada}} = \frac{E_{CO_{2eqv},a}}{(CCU_a \cdot D_a \cdot Q_{Va})} \quad \text{eq. (6)}$$

onde:

CCU_a : capacidade de carga útil dos veículos fabricados no ano a (ponderada por classificação - Anexo F – Capacidades de carga útil ponderadas).

2.3 Renovação da frota

Após a determinação da frota circulante, do consumo de combustível, das emissões de poluentes e de GEE correspondentes aos veículos produzidos em cada ano, foram estabelecidos alguns critérios para que pudesse avaliar impacto da renovação de parcelas da frota. Como comentado anteriormente, foi utilizado o ano de 2023 como base para os estudos em função da disponibilidade de dados.

Alguns cenários hipotéticos de renovação de frota foram criados com o objetivo de analisar a sensibilidade do efeito de substituição de veículos obsoletos por modelos mais modernos em termos de emissão de poluentes e gasto energético. Levando-se em consideração a idade média dos veículos na frota, concentração de acordo com sua idade

e nível de tecnologia adotada por fases do PROCONVE, os cenários de renovação de frota consideraram substituição de veículos com idade dentro de um intervalo de tempo específico por veículos fabricados em 2023. Para isso, inicialmente estimaram-se as emissões de poluentes, consumo de combustível, distância percorrida e capacidade de carga útil da frota de 2023, que foi então considerado o cenário de referência.

Em um segundo instante, foi subtraído um valor percentual da quantidade de veículos da porção da frota fabricada no intervalo selecionado e incrementada a quantidade de veículos fabricados em 2023, de modo que a capacidade de carga útil global da frota fosse a mesma. Posteriormente, calculou-se a distância percorrida pelos novos veículos de maneira que a mudança na distância percorrida total fosse proporcional à alteração do número de veículos. Nota-se então que nos cenários simulados a razão de substituição aplicada foi diferente de 1:1, pois os caminhões mais novos podem transportar maiores cargas e percorrem maior distância por ano.

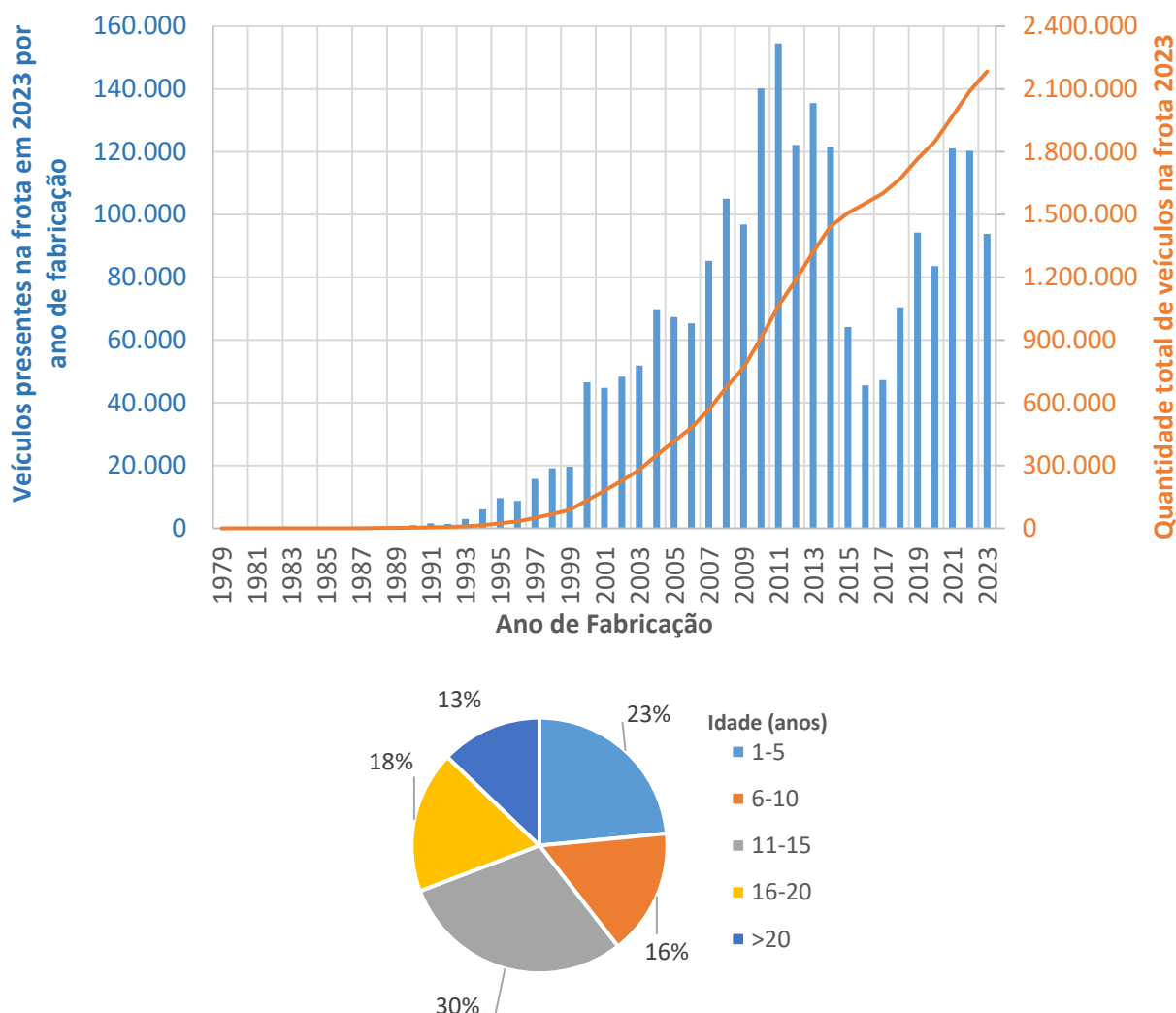
Essa metodologia contempla, por conseguinte, a substituição de caminhões por modelos de capacidade superior e o consequente decremento do número de viagens para a realização de fretes rodoviários, fenômeno observado no setor de transportes nos últimos anos. Não foi explorado nesse trabalho como se daria a efetiva renovação ou qual seria o incentivo à renovação. Simplesmente, a partir de um cenário de renovação, se equalizou a oferta de mesma capacidade de transporte.

3 Resultados

3.1 Frota circulante

A Figura 3.1 mostra como a frota de veículos pesados em 2023 estava segmentada em função do ano de fabricação, totalizando cerca de 2.183.463 veículos, sendo consideráveis as participações dos veículos fabricados entre 2010 e 2014. A partir de então, há um rápido decréscimo da participação até 2017, quando ocorre novo aumento na taxa de participação ano a ano. A parte inferior da imagem traz a distribuição da frota de 2023 em função do ano de fabricação dos veículos.

Figura 3.1 – Estimativa de composição da frota de veículos pesados em 2023 e sua distribuição.



Fonte: adaptado de (SINDIPEÇAS, 2024).

Nota-se que, de acordo com a base de dados utilizada para este estudo, cerca de 60% da frota de 2023 é formada por veículos com mais de 10 anos desde a fabricação, e 13% com mais de 20 anos.

3.2 Emissões de poluentes regulamentados e de GEE

Os gráficos apresentados a seguir representam as estimativas de emissões de alguns dos poluentes regulamentados pelo PROCONVE, como resultado dos cálculos indicados nos capítulos anteriores. Busca-se, ao analisar as distribuições, observar a relevância dos veículos de diferentes idades nas emissões atmosféricas e as desproporções entre quantidade de veículos na frota e percentual de emissões para cada quinquênio. Notar que os valores dos fatores de emissão usados nos cálculos foram referentes aos dados de homologação quando novos. O aumento das emissões devido ao desgaste e manutenção do veículo não foram considerados nesse estudo.

A Figura 3.2 e a Figura 3.3 mostram as emissões de CO e NO_x, respectivamente, causadas em 2023 pelos veículos fabricados em cada ano da frota, demonstram um comportamento semelhante entre si.

Figura 3.2 – Emissões de CO em 2023 geradas pelos veículos de cada ano de fabricação.

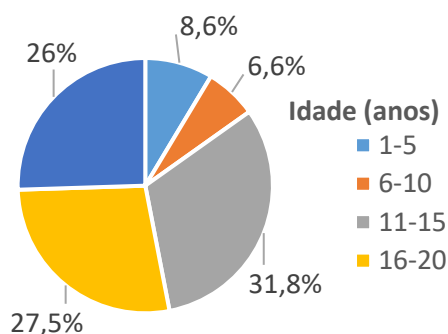
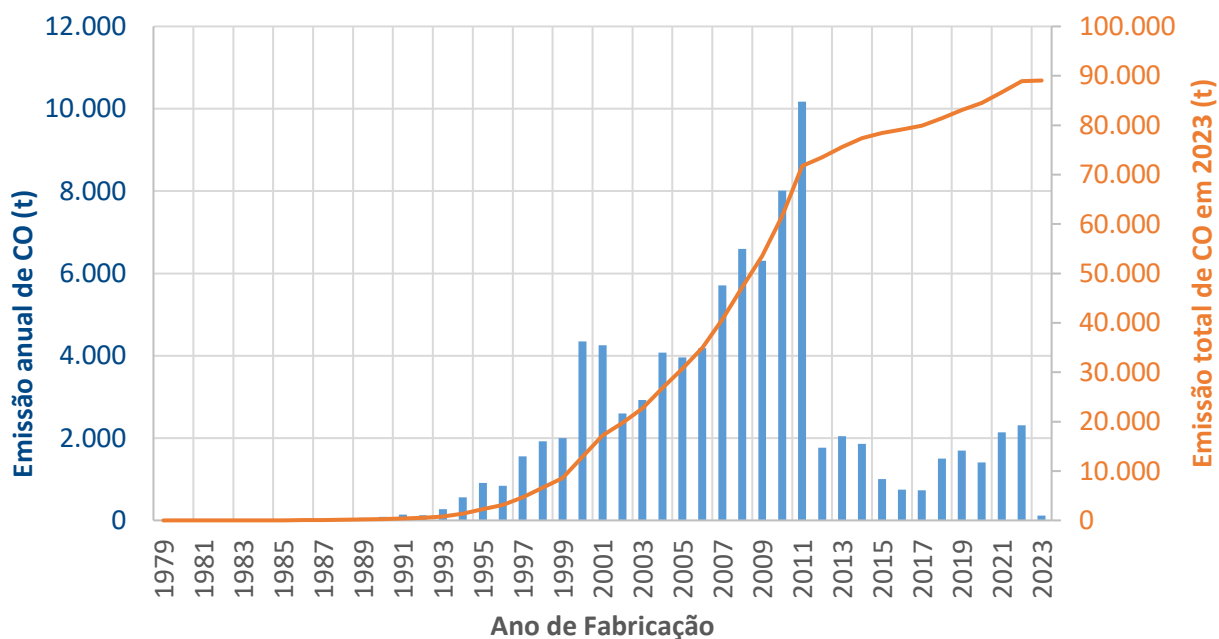
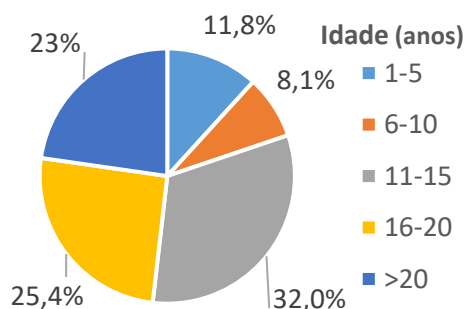
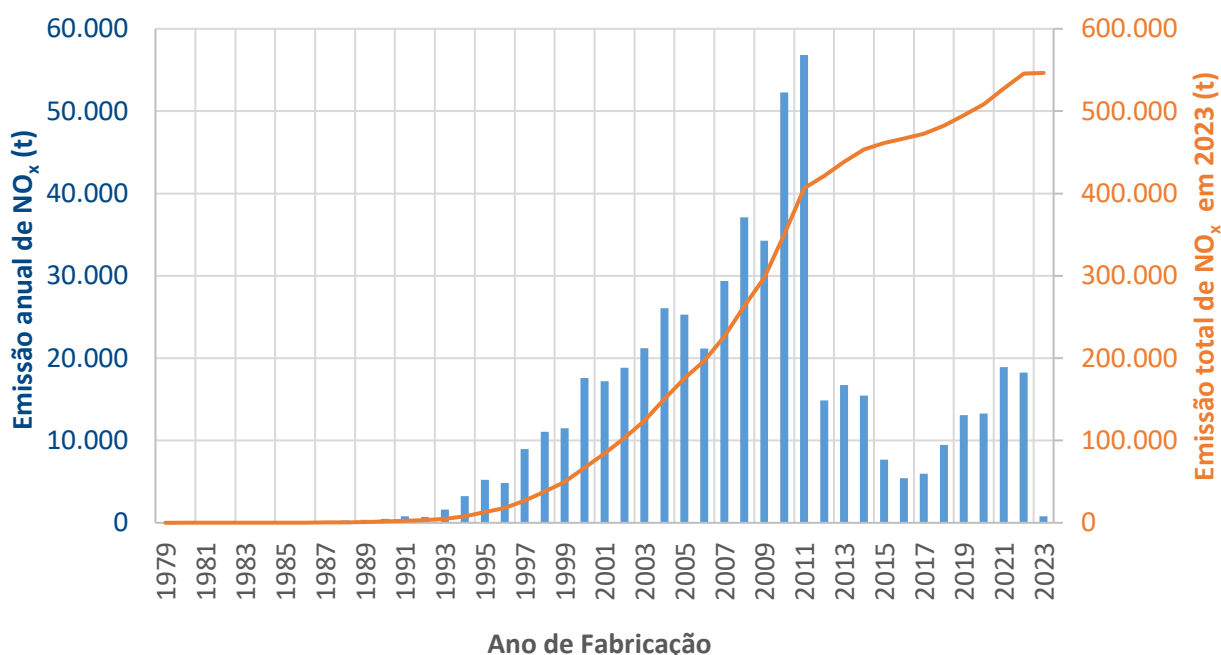


Figura 3.3 – Emissões de NO_x em 2023 geradas pelos veículos de cada ano de fabricação.

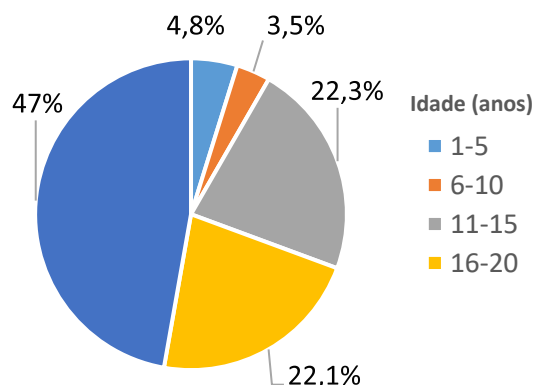
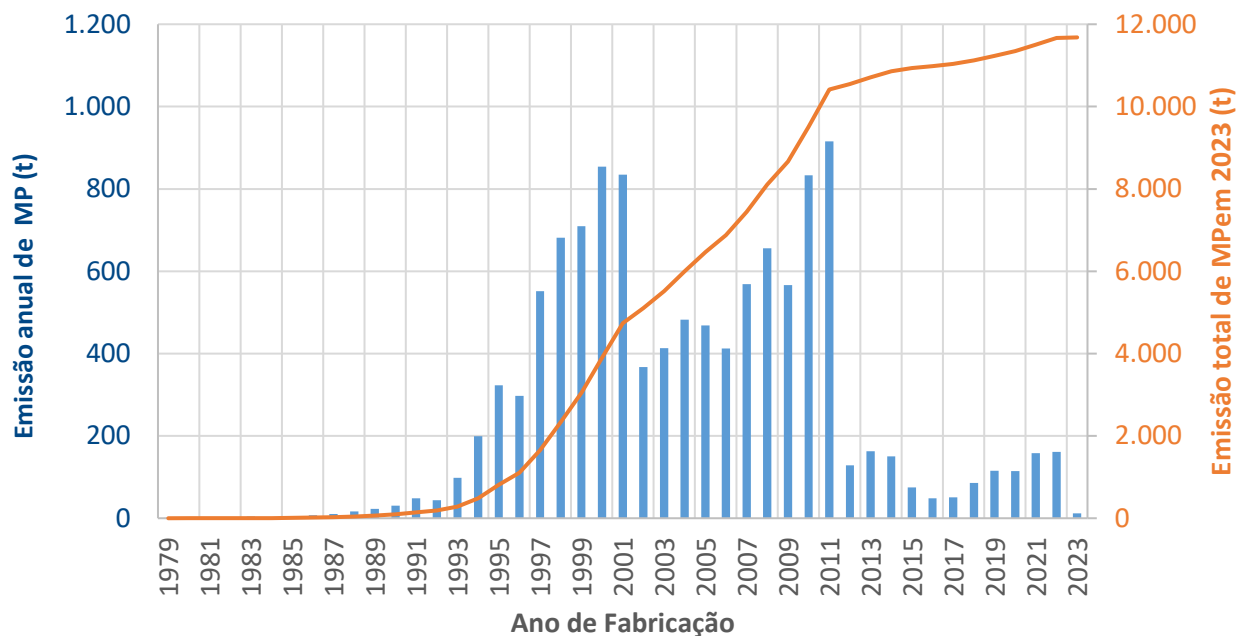


Fonte: autores.

É possível observar que as massas de poluentes em questão emitidas por caminhões de 1979 a 1993 causam baixíssimo impacto no panorama geral. Este comportamento se dá pelo número reduzido de equipamentos circulantes e baixa intensidade de uso, ligados à necessidade de constante manutenção das tecnologias obsoletas. No intervalo de tempo seguinte, de 1994 a 2011, ocorre um crescimento quase que exponencial das emissões de CO e NO_x, uma vez que essa parcela contém ainda muitos veículos plenamente utilizados no transporte rodoviário e que não atendem aos limites mais recentes de homologação. A partir de 2012, é notória a redução de emissões causada pela implementação da fase P7 do PROCONVE. Além disso, o contexto socioeconômico nacional provocou uma diminuição no volume de equipamentos fabricados nesta época. Por último, vale ressaltar que houve uma redução ainda mais acentuada em 2023, resultado da implementação da fase P8 do PROCONVE.

A Figura 3.4 e a Figura 3.5 mostram emissões de material particulado e HC, respectivamente, causadas em 2023 pelos veículos fabricados em cada ano da frota

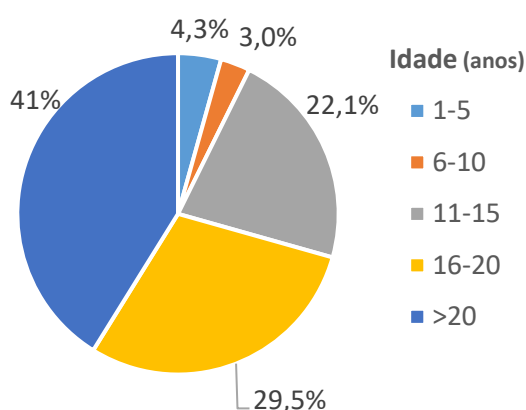
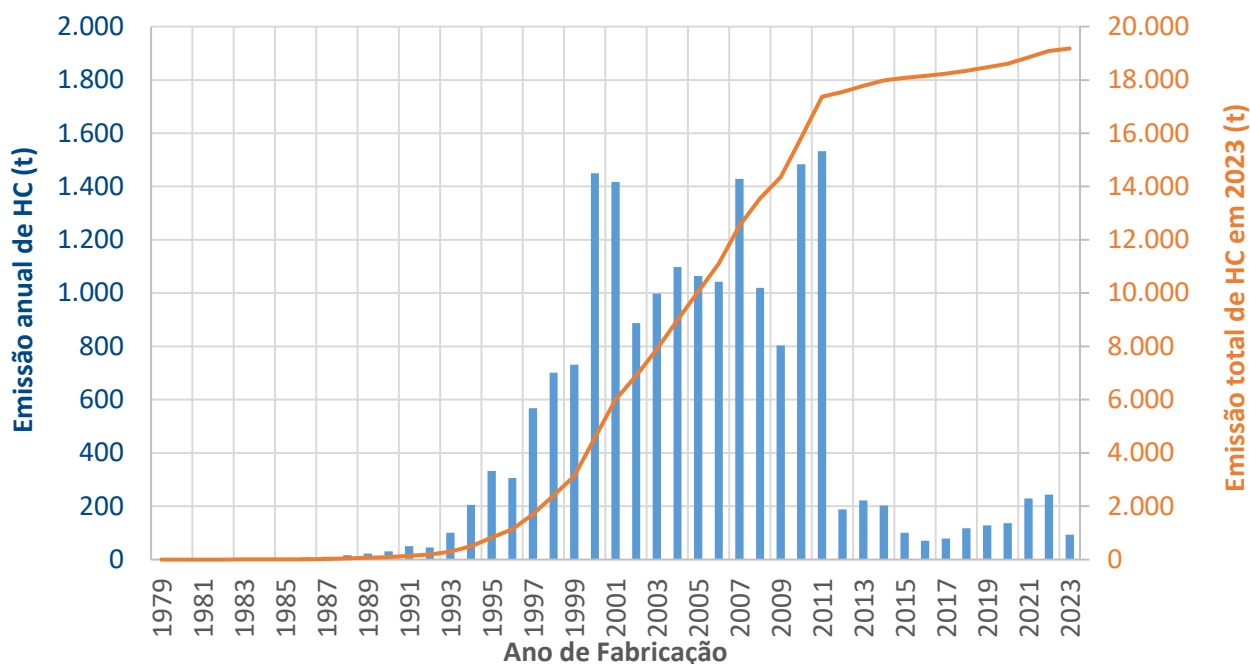
Figura 3.4 – Emissões de MP em 2023 geradas pelos veículos de cada ano de fabricação.



Fonte: autores.

É possível observar uma grande desproporção entre a quantidade de veículos com mais de 20 anos de idade e sua relevância nas emissões gerais de poluentes. Isto se dá de maneira ainda mais acentuada do que o registrado nos resultados de CO e NO_x, e está relacionado ao nível tecnológico profundamente defasado em relação ao controle de emissões atmosféricas. Ainda assim, a parcela de 2000 a 2011 continua contribuindo vastamente no montante nacional dos poluentes apresentados (maior número de veículo e maior distância percorrida anualmente do que os mais antigos), tendo severa redução a partir da implementação do PROCONVE P7 e, novamente, na fase P8.

Figura 3.5 – Emissões de HC em 2023 geradas pelos veículos de cada ano de fabricação.



Fonte: autores.

A fim de evidenciar o panorama geral de emissões por idade, estão demonstrados abaixo os valores aproximados de emissões por caminhões relacionados às faixas de idade “10 anos” – para caminhões com mais de 10 anos – e “20 anos” – para caminhões com mais de 20 anos².

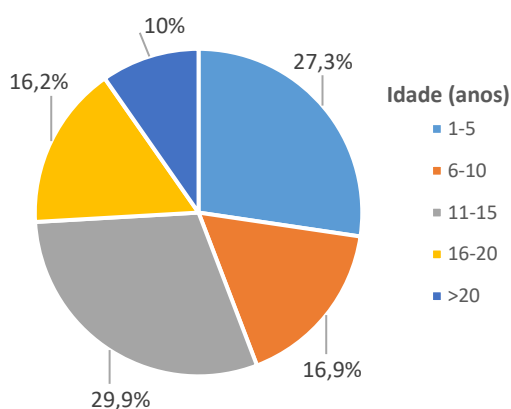
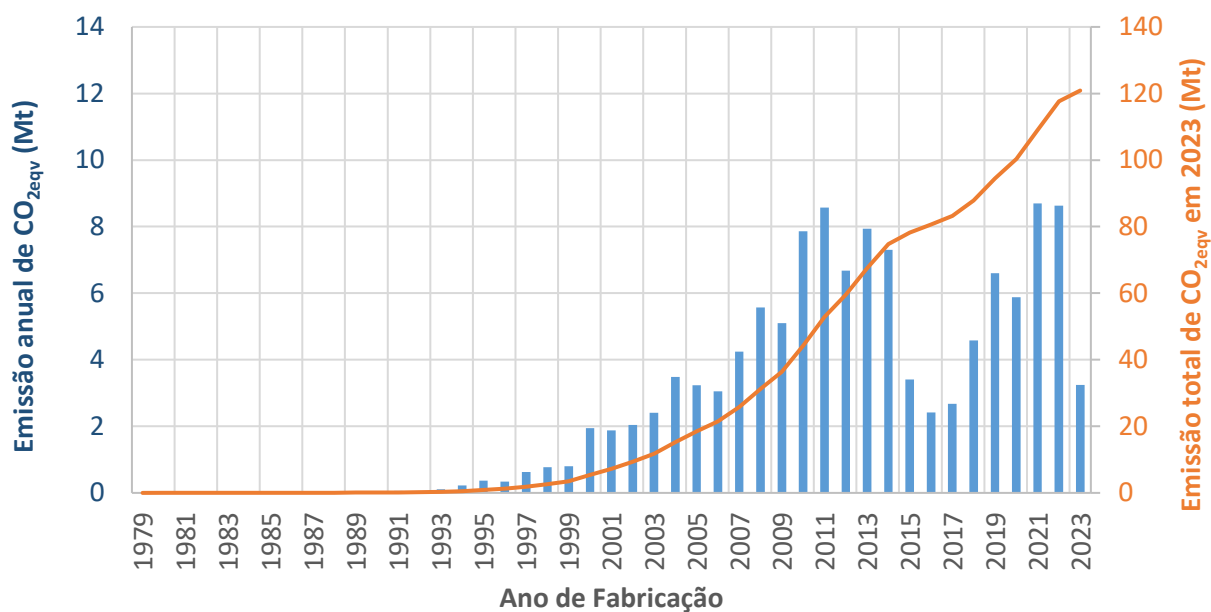
- Monóxido de carbono – CO:
 - 85% da emissão de CO em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 10 anos;
 - 26% da emissão de CO em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 20 anos.
- Óxidos de nitrogênio – NO_x:

² 10 e 20 anos de idade em relação ao ano-base de 2023.

- 80% da emissão de NO_x em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 10 anos;
- 23% da emissão de NO_x em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 20 anos.
- Material particulado – MP:
 - 92% da emissão de MP em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 10 anos;
 - 47% da emissão de MP em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 20 anos.
- Hidrocarbonetos não queimados – HC:
 - 93% da emissão de HC em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 10 anos;
 - 41% da emissão de HC em 2023 foram causados pela frota com idade maior ou igual a 20 anos.

Distintamente dos gases poluentes com limites regulamentados, a emissão de CO_{2eqv} foi menos sensível à qualidade da combustão e de sistemas de pós-tratamento, sendo predominantemente proporcional ao trabalho mecânico realizado e, conseqüentemente, à quantidade e à eficiência global dos veículos da frota. Este fato, associado à crescente demanda logística, evidencia um panorama desafiador de redução de GEE de maneira global no setor de transportes, mesmo com avanços tecnológicos relevantes. A Figura 3.6 traz a distribuição das massas emitidas de CO_{2eqv} por cada parcela da frota em 2023 e distribuição por cada quinquênio da frota nacional.

Figura 3.6 – Emissões de CO_{2eqv} em 2023 geradas pelos veículos de cada ano de fabricação.

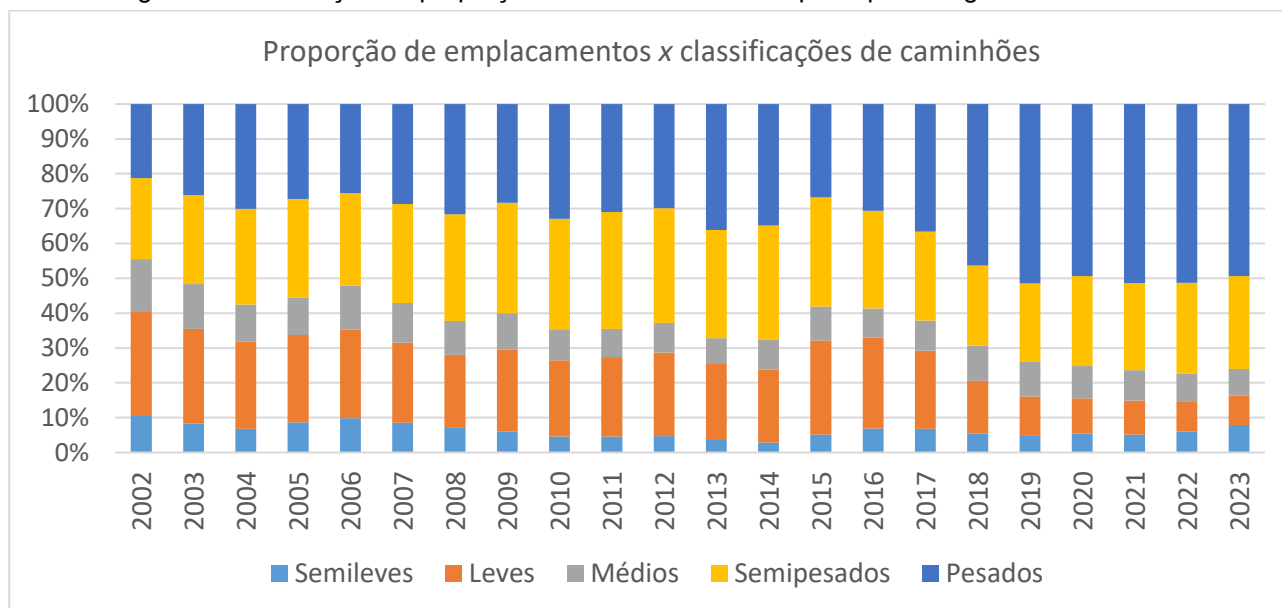


Fonte: autores.

3.3 Perfil da frota e evolução da emissão específica de CO_{2eqv}

Como anteriormente explicitado, o aumento da capacidade de carga útil de modo geral e da implementação de melhorias veiculares causam otimização da eficiência energética da frota. O gráfico da Figura 3.7 traz a evolução da proporção de veículos de transporte registrados nos últimos anos com base no Anuário ANFAVEA (ANFAVEA, 2024). Nota-se que em 2000, cerca de 45% dos veículos emplacados eram semipesados ou pesados, enquanto em 2023 essa parcela subiu para 65% dos veículos emplacados, evidenciando o crescimento do transporte de maiores cargas.

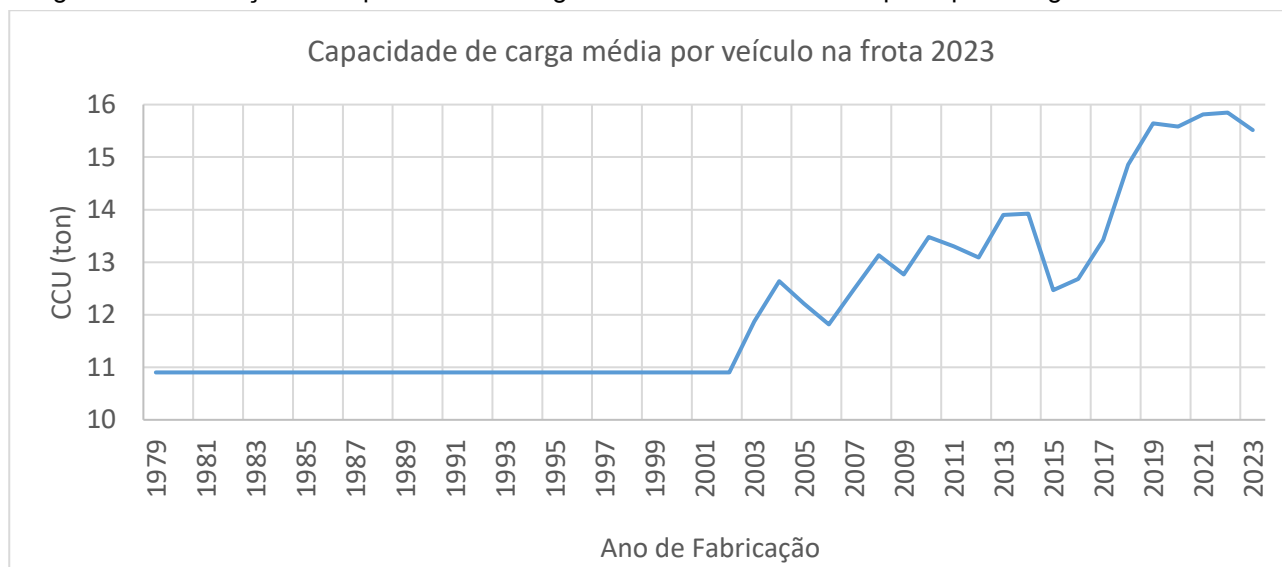
Figura 3.7 – Evolução da proporção dos veículos de transporte por categoria – 2002-2023.



Fonte: adaptado de (ANFAVEA, 2024).

Já o gráfico da Figura 3.8 exibe a estimativa da capacidade de carga média dos veículos de cada ano na frota circulante de 2023, baseado nas capacidades médias obtidas via catálogo das fabricantes de caminhões e das proporções de classificações anuais³. Novamente há uma tendência de aumento da capacidade de carga útil por veículo ao longo dos últimos anos.

Figura 3.8 – Evolução da capacidade de carga útil dos veículos de transporte por categoria – 1979-2023.



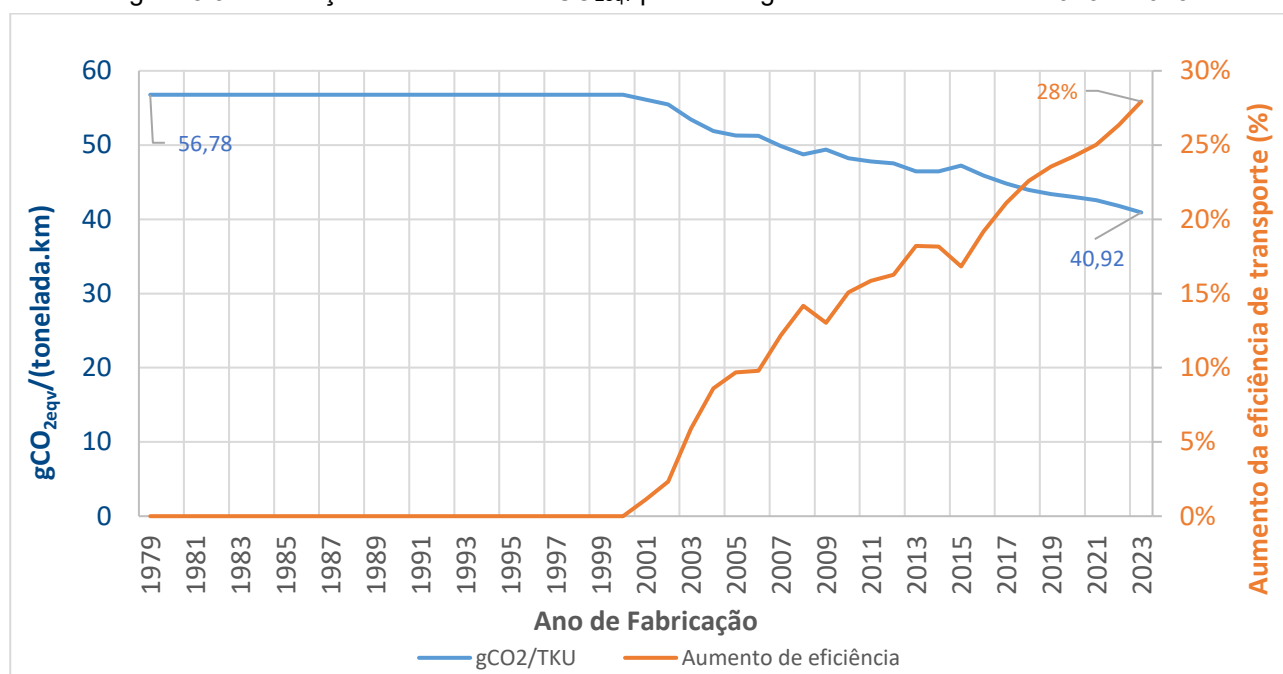
Fonte: autores.

Associando-se então o aumento da eficiência dos veículos (Figura 1.3) ao aumento da capacidade de carga da frota (Figura 3.8), chega-se à evolução da emissão específica de

³ Por indisponibilidade de dados anteriores a 2002, a CCU foi mantida constante.

CO_{2eqv} por tonelada e por quilometro rodado mostrada na Figura 3.9, Em 1979, de forma conservadora, estimou-se um valor de 56,78 gCO_{2eqv}/km.ton para o veículo médio da frota, valor esse que caiu para 40,92 gCO_{2eqv}/km.ton – o que correspondeu a um aumento de eficiência obtido no período estudado de cerca de 28% em termos de CO_{2eqv}/tku. Nota-se que no gráfico exposto, os valores são constantes de 1979 a 2000. Isso se dá pois os autores não puderam encontrar em fontes públicas dados atualizados de abrangência nacional e, partindo de uma premissa conservadora, empregaram o parâmetro mais recente disponível para os veículos mais antigos, apesar da clara tendência de otimização evidenciada.

Figura 3.9 – Evolução da emissão de CO_{2eqv} por de carga útil e distância entre 1979 e 2023.



Fonte: autores.

3.4 Cenários hipotéticos de renovação de frota

Com base nos resultados obtidos foi possível traçar diferentes cenários de renovação de frota com o intuito de entender o potencial de redução de emissões poluentes e de gases de efeito estufa de acordo com os critérios de definição da idade da frota a ser renovada. No escopo deste estudo, três cenários foram criados:

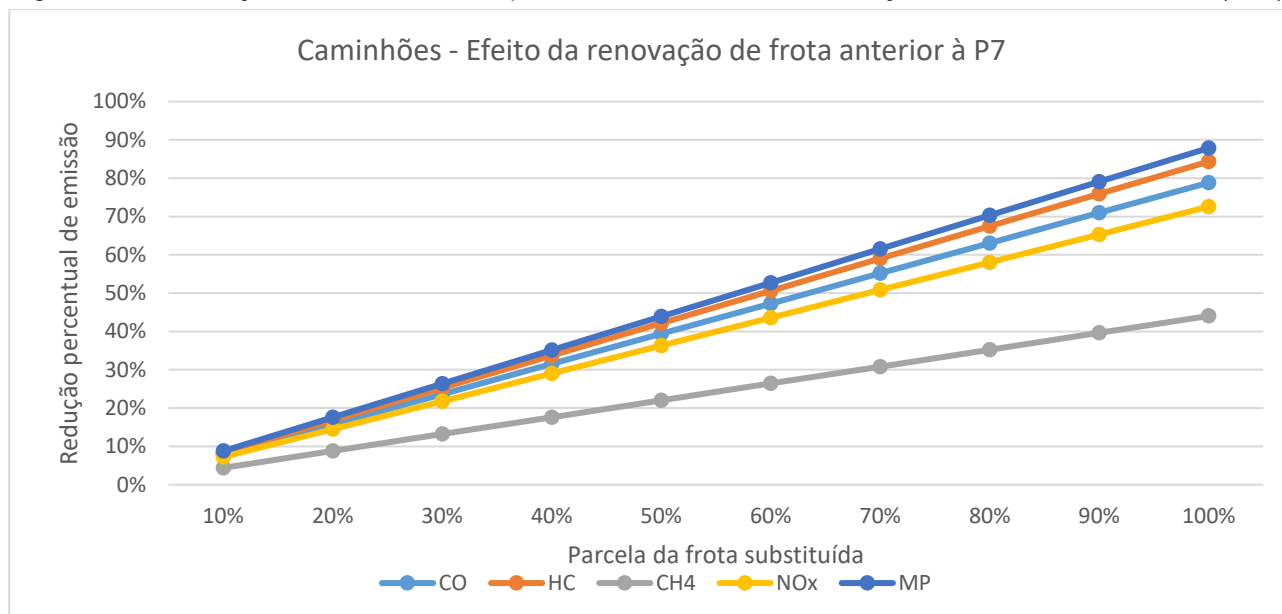
- Renovação de veículos anteriores a fase P7 do PROCONVE;
- Renovação de veículos com mais de 10 anos de idade;
- Renovação de veículos com mais de 20 anos de idade.

Os resultados de redução de gases poluentes e de efeito estufa para cada cenário são mostrados a seguir.

3.4.1 Renovação de veículos anteriores à fase P7

A Figura 3.10 ilustra o efeito da renovação de frota anterior àquela que atende à norma da fase P7 nas emissões regulamentadas pelo PROCONVE. Este escopo incluiu caminhões anteriores à 2012, que de acordo com o ano de referência da frota, seria equivalente a veículos com mais de 12 anos de idade⁴.

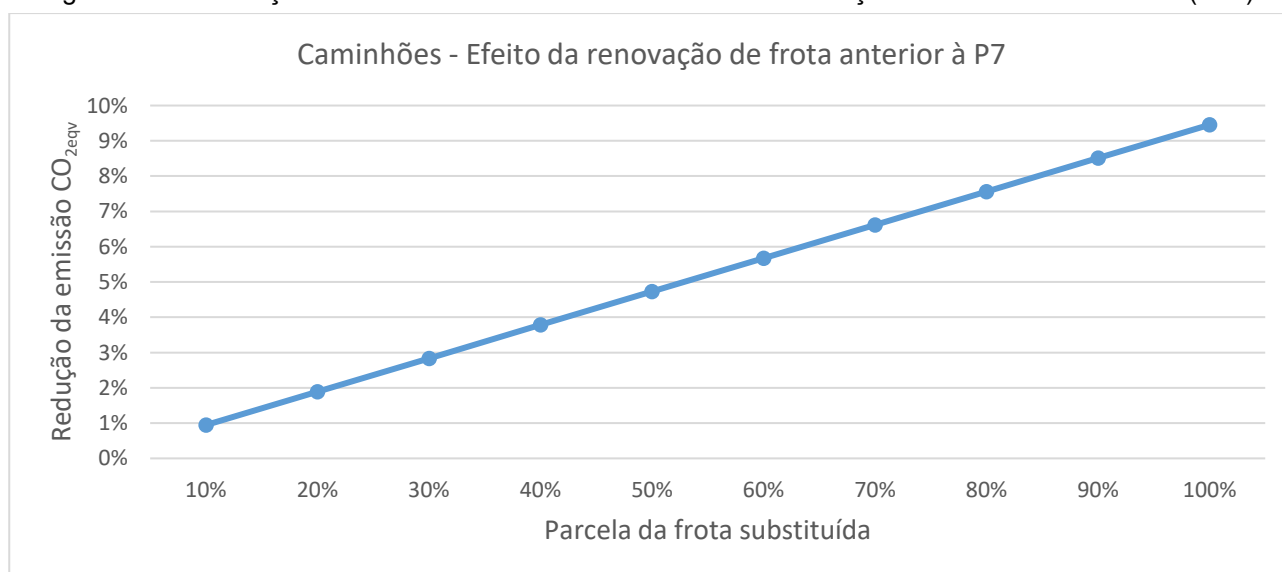
Figura 3.10 – Reduções das emissões de poluentes no cenário de renovação de frota anterior a 2012 (<P7).



Fonte: autores.

Além disso, quando observados os GEE, nota-se que é possível reduzir cerca de 9,5% das emissões de CO_{2eqv}, como mostrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Reduções das emissões de GEE no cenário de renovação de frota anterior a 2012 (<P7).



Fonte: autores.

⁴ 12 anos de idade com base no ano de 2023.

Para uma renovação de 100% da frota selecionada, os percentuais de reduções estimados estão resumidos na Tabela 3-1:

Tabela 3-1 – Redução das emissões de gases poluentes e de efeito estufa no cenário anterior à fase P7.

Cenário	CO	HC	CH₄	NO_x	MP	CO_{2eqv}
<P7	78,8%	84,3%	44,0%	72,6%	87,9%	9,5%

Neste cenário, para uma completa renovação, haveria a substituição de 1.063.848 veículos antigos da frota por 850.754 novos, significando uma razão de substituição de 1,25:1. Se esse cenário fosse atingido em 10 anos, cerca de 106.348 veículos deveriam ser sucateados e 85.075 novos (novos em 2023) passariam a compor a frota.

3.4.2 Renovação de veículos com mais de 10 e 20 anos de idade

Utilizando a mesma metodologia, foram então estudados os cenários de renovação de frota de 100% dos veículos com idades maiores do que 10 e 20 anos⁵, o que corresponderia à renovação de caminhões fabricados anteriormente a 2014 e a 2004 respectivamente. Os resultados de redução de emissões de poluentes e de GEE são mostrados na Tabela 3-2:

Tabela 3-2 - Redução de emissões de gases poluentes e de efeito estufa nos cenários de 10 e 20 anos de idade.

Cenário	CO	HC	CH₄	NO_x	MP	CO_{2eqv}
10 anos	82,5%	84,5%	56,1%	77,8%	89,9%	11,0%
20 anos	25,2%	40,0%	10,0%	22,4%	47,0%	3,4%

O cenário de renovação dos veículos com 10 anos ou mais contemplaria a substituição de 1.321.427 caminhões antigos por 1.075.128 novos (razão de 1,23:1), e o cenário com 20 anos ou mais substituiria 279.693 veículos antigos por 199.783 novos (razão de 1,40:1).

⁵ 10 e 20 anos de idade com base no ano de 2023.

4 Conclusões e considerações adicionais

O salto tecnológico dos sistemas de controle e pós-tratamento de exaustão e a eficácia da implementação das fases do PROCONVE são evidentes, uma vez que veículos de 1 a 10 anos representam cerca de 40% da frota e de ~7,3 a 19,9% das emissões de poluentes regulamentados. Apesar disso, a parcela da frota com aplicação de tecnologias obsoletas ainda é muito significativa e responsável por parte majoritária das emissões nocivas à saúde humana. Além disso, o PROCONVE também contribuiu para o registro de dados de domínio público, escassos no período anterior aos anos 2000.

De acordo com o primeiro cenário hipotético de renovação de frota proposto, que tratou de veículos anteriores à fase P7 do PROCONVE (veículos com 12 anos), é possível gerar atenuação abrupta de, no máximo, 72,6% e 87,9% em NO_x e MP, respectivamente. Além disso, a renovação total neste primeiro cenário promoveria ganhos substanciais na emissão de $\text{CO}_{2\text{eqv}}$, que chegariam a 9,45%.

Em um segundo cenário, quando o escopo é ampliado para veículos com mais de 10 anos, a redução é ainda maior, chegando a 77,8% de NO_x e 89,9% de MP. Estima-se também redução na emissão de $\text{CO}_{2\text{eqv}}$ de 11,0% com substituição total da frota com mais de 10 anos e 3,4% com substituição da frota com mais de 20 anos. A grande diferença entre os dois intervalos se dá não só pela diferença no número de veículos, mas também pelo fator de intensidade de uso, muito inferior em veículos com mais de 20 anos.

Os ganhos de eficiência energética se dão através da soma de diversos fatores, sendo os principais:

- Desenvolvimento de sistemas de propulsão com mais tecnologia embarcada;
- Otimização de sistemas periféricos, de controle, projeto aerodinâmico, freios, compressores e condicionadores de temperatura, além de aplicações de ligas metálicas mais leves e resistentes;
- Aprimoramento logístico que permitiu o aumento da concentração de caminhões pesados na frota atual.

Apesar de não ter sido escopo deste trabalho, a renovação da frota tem potencial positivo em outros fatores além da redução significativa nas emissões de gases e poluentes, como segurança, diminuição do número de incidentes de trânsito – e consequente congestionamento de vias públicas – aumento da eficiência logística com maior velocidade média de deslocamento e melhor capacidade de adaptação dos veículos com incremento da concentração de biodiesel no combustível comercial.

Complementarmente, os resultados de redução de emissões dos cenários foram calculados com base na substituição de veículos antigos por veículos fabricados em 2023. A implementação de tecnologias posteriores, capazes de melhorar a eficiência energética e/ou redução de emissão de GEE dos caminhões, tais como uso de biometano, hidrogênio, etanol ou hibridização, contribuiria significativamente no efeito da renovação.

Por fim, para realização das estimativas, fez-se necessário a ponderação e extrapolação de informações de diferentes bases de dados, uma vez que existe carência de registros de domínio público anteriores aos anos 2000 e atualizados com abrangência nacional. A inexistência de tais dados impacta a incerteza dos resultados estimados. Iniciativas colaborativas entre diferentes órgãos e associações, como a realizada na criação do 2º Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários (2013), são de suma importância para criação de políticas públicas eficazes.

5 Bibliografia

- ANFAVEA. (2024). *Anuário Anfavea*. Anuário. Fonte: https://anfavea.com.br/site/wp-content/uploads/2024/04/ANFAVEA-ANUARIO-DIGITAL-2024_compressed.pdf
- Branco, J., Bartholomeu, D., Nocera, P., & Caixeta, J. (2023). Ações e políticas para redução da emissão de CO₂ no transporte de cargas do Brasil. doi:10.58922
- CETESB. (2023). *Emissões veiculares no estado de São Paulo*. São Paulo. Fonte: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2024/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2023.pdf>
- EPE. (2022). *NT - Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário Intensidade de carbono das fontes de energia*. Fonte: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-768/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf
- EPE. (2024). *Atlas da Eficiência Energética Brasil*. Fonte: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-857/Atlas%20da%20Efici%C3%Aancia%20Energ%C3%A9tica%20Brasil%202024.pdf>
- EPE. (2025). *NT - Descarbonização do Setor de Transporte Rodoviário. Intensidade de carbono das fontes de energia*. Fonte: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/topico-770/NT-EPE-DPG-SDB-2025-03_Intensidade_de_Carbono_Transporte_Rodovi%C3%A1rio.pdf
- FGV. (2025). *Programa Brasileiro GHG Protocol*. Fonte: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>
- Guiadotrc. (s.d.). *Tipos de veículos e suas capacidades de carga*. Fonte: Guia do trc: <https://guiadotrc.com.br/pagina/tipos-de-veiculos-e-suas-capacidades-de-carga/1>
- IBAMA. (2011). *Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores*. Brasília. Fonte: https://www.gov.br/ibama/pt-br/phocadownload/veiculosautomotores/manual_proconve-promot_portugues.pdf
- Meszler, D., Lutsey, N., & Delgado, O. (2015). *Cost effectiveness of advanced efficiency technologies for long-haul tractor-trailers in the 2020–2030 timeframe*. International Council on Clean Transportation. Acesso em 10 de 2025, disponível em <https://theicct.org/publication/cost-effectiveness-of-advanced-efficiency-technologies-for-long-haul-tractor-trailers-in-the-2020-2030-timeframe/>

- Ministério do Meio Ambiente. (1896). *Resolução 18/1986*. Fonte: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=41
- MMA. (2013). *Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários*. Brasília. Fonte: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/meio-ambiente-urbano-recursos-hidricos-qualidade-ambiental/qualidade-do-ar/repositorio/grupo-de-trabalho-inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios/inventario_de_emissoes_por_vei
- MME; EPE; IEA. (2021). *Transporte Rodoviário de Cargas Brasil*. Brasília. Fonte: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20\[PT\].pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-626/IEA-EPE_Brazilian_Road_Freight_Transport_Benchmarking-2021.09.09%20[PT].pdf)
- Reis, M. T. (2016). *Análise do Consumo de Combustíveis Líquidos e Emissões no Setor de Transportes do Brasil*. Rio de Janeiro. Fonte: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/17265/1/monopoli10016643.pdf>
- SINDIPEÇAS. (2024). *Relatório da Frota Circulante*. Fonte: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2024/Frota_Circulante.pdf

Anexo A – Valores de frota circulante em 2023

A Tabela auxiliar A traz os valores de frota circulante no ano de 2023 no Brasil, segmentados pelos anos de fabricação e que foram empregados no trabalho, a partir dos dados disponibilizados pelo SINDIPEÇAS.

Tabela auxiliar A – Quantidade de veículos circulantes na frota de caminhões de 2023 por ano de fabricação, de acordo com SINDIPEÇAS (2023).

Idade	Ano de fabricação	Quantidade de veículos circulantes
1	2023	93.873
2	2022	120.255
3	2021	121.043
4	2020	83.562
5	2019	94.258
6	2018	70.395
7	2017	47.196
8	2016	45.585
9	2015	64.192
10	2014	121.677
11	2013	135.477
12	2012	122.102
13	2011	154.512
14	2010	140.165
15	2009	96.774
16	2008	105.013
17	2007	85.220
18	2006	65.383
19	2005	67.282
20	2004	69.806
21	2003	51.863
22	2002	48.311
23	2001	44.720
24	2000	46.566
25	1999	19.594
26	1998	19.167
27	1997	15.814
28	1996	8.695
29	1995	9.626
30	1994	6.056
31	1993	3.038
32	1992	1.386
33	1991	1.578
34	1990	1.004
35	1989	759
36	1988	570
37	1987	352
38	1986	271
39	1985	106
40	1984	42
41	1983	154
42	1982	8
43	1981	7
44	1980	4
45	1979	2

Fonte: (SINDIPEÇAS, 2024).

Anexo B – Composição da frota circulante em 2023

A Tabela auxiliar B detalha a composição da frota em 2023, indicando a quantidade de licenciamentos por categoria de veículos – desde os semileves aos pesados - e a proporção de cada categoria na frota. Tais valores foram obtidos a partir dos dados disponibilizados pela ANFAVEA.

Tabela auxiliar B – Composição da frota - quantidade de licenciamentos de caminhões de acordo com ano de fabricação do caminhão.

Ano de fabricação	Semileves		Leves		Médios		Semipesados		Pesados		Total
	total	%	total	%	total	%	total	%	total	%	
2023	8.594	8%	9.040	8%	8.320	8%	28.771	27%	53.299	49%	108.024
2022	7.553	6%	10.811	9%	10.423	8%	32.851	26%	65.005	51%	126.643
2021	6.586	5%	12.577	10%	11.185	9%	32.187	25%	66.144	51%	128.679
2020	4.859	5%	9.049	10%	8.357	9%	23.120	26%	44.293	49%	89.678
2019	5.079	5%	11.242	11%	10.069	10%	22.805	23%	52.140	51%	101.335
2018	4.122	5%	11.554	15%	7.677	10%	17.414	23%	35.238	46%	76.005
2017	3.518	7%	11.687	22%	4.449	9%	13.295	26%	18.994	37%	51.943
2016	3.514	7%	13.161	26%	4.221	8%	14.186	28%	15.478	31%	50.560
2015	3.709	5%	19.375	27%	6.965	10%	22.459	31%	19.144	27%	71.652
2014	3.967	3%	28.725	21%	11.699	9%	44.883	33%	47.781	35%	137.055
2013	5.522	4%	34.090	22%	11.135	7%	47.943	31%	55.886	36%	154.576
2012	6.551	5%	33.346	24%	11.849	9%	45.877	33%	41.551	30%	139.174
2011	7.893	5%	39.453	23%	14.052	8%	57.955	34%	53.517	31%	172.870
2010	7.325	5%	34.466	22%	14.038	9%	49.985	32%	51.893	33%	157.707
2009	6.604	6%	25.823	24%	11.503	10%	34.773	32%	31.124	28%	109.827
2008	8.863	7%	25.441	21%	11.888	10%	37.434	31%	38.661	32%	122.287
2007	8.468	9%	22.639	23%	11.239	11%	27.940	28%	28.299	29%	98.585
2006	7.451	10%	19.385	26%	9.538	13%	20.189	27%	19.408	26%	75.971
2005	6.891	9%	19.943	25%	8.449	11%	22.597	28%	21.653	27%	79.533
2004	5.493	7%	20.245	25%	8.647	11%	22.308	28%	24.341	30%	81.034
2003	5.460	8%	17.925	27%	8.485	13%	16.883	26%	17.209	26%	65.962
2002	6.898	11%	19.627	30%	9.907	15%	15.276	23%	13.972	21%	65.680

Fonte: (ANFAVEA, 2024).

Anexo C – Fatores de emissão ponderados

A Tabela auxiliar C traz os fatores de emissão ponderados a partir da proporção dos veículos na frota de 2023 e a partir dos fatores de emissão de cada categoria disponibilizados pela CETESB. Com esses valores, pôde-se criar um veículo médio, com emissões médias, para cada ano de fabricação.

Tabela auxiliar C – Fatores de emissão ponderados pelas proporções entre tipos de caminhões por ano de fabricação.

Ano de fabricação	CO (g/km)	HC (g/km)	CH ₄ (g/km)	NO _x (g/km)	MP (g/km)	N ₂ O (g/km)
2023	2,38E-02	1,83E-02	2,44E-03	1,54E-01	2,38E-03	3,00E-02
2022	1,77E-01	1,87E-02	6,00E-02	1,40E+00	1,24E-02	3,00E-02
2021	1,66E-01	1,78E-02	6,00E-02	1,46E+00	1,22E-02	3,00E-02
2020	1,61E-01	1,55E-02	6,00E-02	1,52E+00	1,31E-02	3,00E-02
2019	1,74E-01	1,32E-02	6,00E-02	1,35E+00	1,19E-02	3,00E-02
2018	2,14E-01	1,69E-02	6,00E-02	1,35E+00	1,22E-02	3,00E-02
2017	1,65E-01	1,78E-02	6,00E-02	1,34E+00	1,14E-02	3,00E-02
2016	1,79E-01	1,70E-02	6,00E-02	1,31E+00	1,17E-02	3,00E-02
2015	1,73E-01	1,74E-02	6,00E-02	1,33E+00	1,30E-02	3,00E-02
2014	1,65E-01	1,80E-02	6,00E-02	1,37E+00	1,33E-02	3,00E-02
2013	1,67E-01	1,81E-02	6,00E-02	1,36E+00	1,33E-02	3,00E-02
2012	1,64E-01	1,75E-02	6,00E-02	1,38E+00	1,20E-02	3,00E-02
2011	7,54E-01	1,14E-01	6,00E-02	4,21E+00	6,79E-02	3,00E-02
2010	6,63E-01	1,23E-01	6,00E-02	4,32E+00	6,89E-02	3,00E-02
2009	7,80E-01	9,94E-02	6,00E-02	4,24E+00	7,01E-02	3,00E-02
2008	7,57E-01	1,17E-01	6,00E-02	4,26E+00	7,53E-02	3,00E-02
2007	8,37E-01	2,09E-01	6,00E-02	4,31E+00	8,34E-02	3,00E-02
2006	8,30E-01	2,07E-01	6,00E-02	4,20E+00	8,17E-02	3,00E-02
2004-2005	7,67E-01	2,06E-01	6,00E-02	4,90E+00	9,07E-02	3,00E-02
2002-2003	7,69E-01	2,63E-01	6,00E-02	5,58E+00	1,09E-01	3,00E-02
2000-2001	1,38E+00	4,61E-01	6,00E-02	5,59E+00	2,72E-01	3,00E-02
Até 1999	1,54E+00	5,63E-01	6,00E-02	8,85E+00	5,46E-01	3,00E-02

Fonte: adaptado de (CETESB, 2023).

Anexo D – Intensidades de uso ponderadas

A Tabela auxiliar D traz os valores calculados de intensidade de uso de um “veículo médio” ponderados a partir da proporção dos veículos na frota de 2023 e a partir das intensidades de uso de cada categoria disponibilizados pelo Ministério de Minas e Energia em 2013. Com esses valores, pôde-se criar um veículo médio, com intensidade de uso média, para cada ano de fabricação.

Tabela auxiliar D – Intensidades de uso ponderadas pelas proporções entre tipos de caminhões por ano de fabricação.

Idade	Ano de fabricação	Distância percorrida (km/ano)
45	1979	47.880
44	1980	49.263
43	1981	50.647
42	1982	52.031
41	1983	53.415
40	1984	54.799
39	1985	56.183
38	1986	57.567
37	1987	58.950
36	1988	60.334
35	1989	61.718
34	1990	63.102
33	1991	64.485
32	1992	65.870
31	1993	67.254
30	1994	68.637
29	1995	70.021
28	1996	71.405
27	1997	72.789
26	1998	74.172
25	1999	75.556
24	2000	76.940
23	2001	78.324
22	2002	79.707
21	2003	81.091
20	2004	82.474
19	2005	83.858
18	2006	85.241
17	2007	86.625
16	2008	88.008
15	2009	89.392
14	2010	90.775
13	2011	92.159
12	2012	93.542
11	2013	94.926
10	2014	96.309
9	2015	97.693
8	2016	99.076
7	2017	100.460
6	2018	101.843
5	2019	103.227
4	2020	104.610
3	2021	105.994
2	2022	107.377
1	2023	108.761

Fonte: adaptado de (MMA, 2013).

Anexo E – Eficiências energéticas ponderadas

A Tabela auxiliar E lista os valores calculados de eficiência energética de um “veículo médio” ponderada a partir da proporção dos veículos na frota de 2023 e a partir das eficiências energéticas publicadas pela Empresa de Pesquisa Energética em 2024. Com esses valores, pôde-se criar um veículo médio, com eficiência energética média ponderada, para cada ano de fabricação.

Tabela auxiliar E - Eficiências energéticas ponderadas pelas proporções entre tipos de caminhões por ano de fabricação.

Ano de fabricação	Consumo(km/L)	Consumo (L/100km)
2023	3,69	27,11
2022	3,53	28,31
2021	3,48	28,76
2020	3,49	28,62
2019	3,45	29,00
2018	3,58	27,89
2017	3,89	25,69
2016	4,02	24,86
2015	3,98	25,15
2014	3,62	27,64
2013	3,63	27,57
2012	3,76	26,57
2011	3,68	27,15
2010	3,60	27,76
2009	3,71	26,93
2008	3,66	27,33
2007	3,76	26,58
2006	3,87	25,86
2005	3,74	26,75
2004	3,57	28,01
2003	3,69	27,09
2002	3,87	25,82
2001	3,83	26,14
Até 2000	3,78	26,44

Fonte: adaptado de (EPE, 2024).

Anexo F – Capacidades de carga útil ponderadas

A Tabela auxiliar F traz os valores calculados de capacidade de carga útil, em toneladas por “veículo médio”, ponderada a partir da proporção dos veículos na frota de 2023 e baseadas em valores encontrados pelo Instituto Mauá de Tecnologia em catálogos de fabricantes e informações de sites especializados. Com esses valores, pôde-se criar um veículo médio, com capacidade média ponderada, para cada ano de fabricação.

Tabela auxiliar F - Capacidade de carga útil ponderada pelas proporções entre tipos de caminhões por ano de fabricação.

Ano de fabricação	CCU (t)
2023	15,51
2022	15,85
2021	15,82
2020	15,58
2019	15,64
2018	14,86
2017	13,42
2016	12,68
2015	12,47
2014	13,93
2013	13,90
2012	13,09
2011	13,31
2010	13,48
2009	12,77
2008	13,13
2007	12,48
2006	11,82
2005	12,21
2004	12,64
2003	11,87
2002	10,90
2001	10,90
2000	10,90
1999	10,90
1998	10,90
1997	10,90
1996	10,90
1995	10,90
1994	10,90
1993	10,90
1992	10,90
1991	10,90
1990	10,90
1989	10,90
1988	10,90
1987	10,90
1986	10,90
1985	10,90
1984	10,90
1983	10,90
1982	10,90
1981	10,90
1980	10,90
1979	10,90

Fonte: adaptado de (GuiaDotrc, s.d.)