

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

VINICIUS ARCO

**ANÁLISE MACROECONÔMICA DAS EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE
AÉREO E RODOVIÁRIO DO BRASIL: UM ESTUDO COMPARATIVO**

Ilha Solteira - SP

18 de Dezembro de 2023



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ANÁLISE MACROECONÔMICA DAS EMISSÕES DE CO₂ NO TRANSPORTE
AÉREO E RODOVIÁRIO DO BRASIL: UM ESTUDO COMPARATIVO**

Discente: Vinicius Arco

Orientadora: Prof. Dra. Luzenira A. Brasileiro

Trabalho de Conclusão de Curso que será apresentado à Faculdade de Engenharia do Câmpus de Ilha Solteira (FEIS), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Ilha Solteira - SP

18 de Dezembro de 2023

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

A675a Arco, Vinicius.
Análise macroeconômica das emissões de CO₂ no transporte aéreo e rodoviário do Brasil: um estudo comparativo / Vinicius Arco. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
55 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Luzenira Alves Brasileiro

Inclui bibliografia

1. Emissões de CO₂ no transporte aeroviário e rodoviário. 2. Cálculo de emissões de CO₂. 3. Impactos socioeconômicos. 4. Mobilidade sustentável. 5. Propostas de mitigação de emissões de CO₂. 6. Relação saúde e emissões de CO₂.


Raiane da Silva Santos
Supervisora Técnica de Arquivo
Serviço Técnico de Referência, Arquivando ao acervo e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CDN/S - 9999

Aluno: **VINICIUS ARCO**

Título: **ANÁLISE MACROECONÔMICA DAS EMISSÕES DE CO2
NO TRANSPORTE AÉREO E RODOVIÁRIO DO BRASIL: UM
ESTUDO COMPARATIVO**

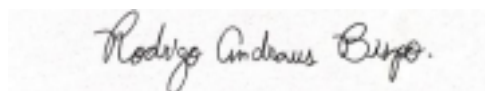
Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA



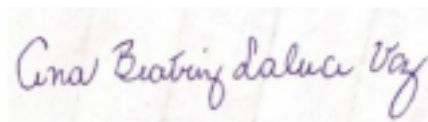
Prof.ª. Dr.ª. Luzenira Alves Brasileiro

UNESP – Campus de Ilha Solteira (Orientadora)



MsC. Rodrigo Andraus Bispo

UNESP – Campus de Ilha Solteira



Mestranda Ana Beatriz Laluce Vaz

UNESP – Campus de Ilha Solteira

Ilha Solteira

18/12/2023

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela sabedoria, coragem e forças que me permitiram chegar até aqui.

Aos meus pais, Edson Aparecido Arco e Fernanda Cristina de Lima Arco, por todo o amor, orações e incentivos durante minha graduação e em cada etapa da minha vida.

Aos meus avôs maternos Geralda Câmara de Lima (in memoriam) e José Augusto de Lima (in memoriam), e aos meus avós paternos, Tereza Arco e Cristóvão Arco grandes mestres de ensinamento da família, que mesmo sem curso superior, me ensinaram o que nenhuma faculdade será capaz de fazer. A meus tios Fabiana, Valente, Amarildo, meus primos Carol, Camila, Kalize, Lais, Bruna, Luana, Richard e Helen, que sempre me mostraram que a família sempre será o bem mais valioso que possuirei.

Aos meus padrinhos de batismo, Flávia Arco Dantas e Robson Dantas, e a minha madrinha de crisma Silvia Helena, por me ensinarem muito durante toda a minha infância, por sempre terem me apoiado e acreditado em mim todo esse tempo.

A minha tia Ivanilda Lemes pelos cuidados e ensinamento em minha infância, principalmente em um momento difícil. A minha tia Maria Perpétua Socorro de Lima Santos, por todos os cuidados, aos ensinamentos éticos e pela educação que me acompanharam pelo resto de minha vida. Ao Guilherme, Gabriela, Larissa e Alessandro, que tiveram presentes durante minha adolescência, e me ensinaram muitas coisas que me transformaram em quem sou hoje.

Aos colegas de estágio da JDE e TEGRA, Liziet Mahrie, Daielen, Dalvinha, Bruna e Rodrigo, pelos aprendizados proporcionados no início de minha trajetória profissional.

Aos engenheiros Vinicius Jodas, Suellen Oliveira, Hugo Batista e Felipe Brilhante, que além dos ensinamentos relacionados a engenharia e projetos, ofereceram toda a ajuda e paciência que foram fundamentais para a minha formação como profissional em engenharia.

Ao meu mestre de obra Valdemar, pelos ensinamentos de campo e de vida, e por toda a paciência para me ensinar anos de vivência profissional.

A minha orientadora, professora Luzenira Brasileiro, por toda orientação, atenção, sugestões e pela confiança em meu trabalho, que sempre me estimularam e aumentaram ainda mais meu interesse na área de transportes.

A Fundação VUNESP, Cursinho Diferencial Andradina e Alicerce, respectivamente pela vaga na universidade pública, pela bolsa de extensão e aprendizado profissional concedido que transformou todo meu trajeto durante a graduação.

E a todos os amigos, em especial, Rafaela, Leticia, Giovanna e Igor. Ademais, os que fiz durante minha passagem por Ilha Solteira, em especial aos meninos da Rep. Mata Burro, Victor, Vicente, Milena, Alex, Dara, Eduardo, Douglas e Augusto, por sempre estarem comigo nos momentos mais difíceis da graduação tornando-os mais fáceis e alegres, além de compartilhar os momentos mais felizes. Vocês ocupam um lugar especial no meu coração e sempre o terão.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes. ”

(Marthin Luther King)

RESUMO

O transporte aéreo e rodoviário possibilita a conexão e desenvolvimento econômico do Brasil. O transporte aéreo por sua vez possibilita viagens de longa distância com rapidez conectando mercadorias e pessoas. Porém o transporte rodoviário fornece uma rede arterial mais abrangente de conexão em nível local e regional permitindo o transporte eficiente para atender às necessidades cotidianas. Ademais, temos que ambos são fontes relativamente significativas de emissões de dióxido de carbono contribuindo para as mudanças climáticas, aquecimento global e gerando impactos econômicos negativos em todo o mundo. Este trabalho busca analisar as emissões de CO₂ de ambos os modais, identificar os principais fatores carburadores de emissões e avaliar seus impactos socioeconômicos no Brasil. Além disso, realiza uma comparação quantitativa entre ambos modais, uma análise sobre relações diretas entre emissões e saúde e propõe estratégias de mitigação de poluição. Por fim, esse estudo destaca a importância da mobilidade urbana de forma sustentável para conciliar as necessidades econômicas com a preservação ambiental brasileira e mundial, fornecendo *insights* relevantes para tomadores de decisão.

Palavras Chave: Emissões de CO₂ no transporte aeroviário e rodoviário; Cálculo de emissões de CO₂; Impactos socioeconômicos; Mobilidade sustentável; Propostas de mitigação de emissões de CO₂; Relação saúde e emissões de CO₂.

ABSTRACT

Air and road transportation enable Brazil's connectivity and economic development. Air transport, in particular, facilitates long-distance travel swiftly, connecting goods and people. Conversely, road transport provides a more extensive network at the local and regional levels, ensuring efficient daily transportation needs. Nevertheless, both modes of transportation significantly contribute to carbon dioxide (CO₂) emissions, thereby contributing to climate change, global warming, and generating adverse economic impacts worldwide. This dissertation aims to analyze the CO₂ emissions from both transportation modes, identify key emission-contributing factors, and assess their socioeconomic impacts in Brazil. Furthermore, it conducts a quantitative comparison between both modalities, an analysis of direct relationships between emissions and health, and proposes strategies for pollution mitigation. Ultimately, this study underscores the importance of sustainable urban mobility in reconciling economic necessities with Brazilian and global environmental preservation, offering valuable insights to decision-makers.

Keywords: CO₂ emissions in air and road transportation; Calculation of CO₂ emissions; Socioeconomic impacts; Sustainable mobility; Proposals for CO₂ emissions mitigation; Health and CO₂ emissions relationship.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO	12
3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA.....	13
3.1 PRINCIPAIS FATORES DE EMISSÕES DE CO2	13
3.2 MUDANÇAS CLIMATICAS RELACIONADA AO TRANSPORTE	17
3.3 IMPACTOS NA SAÚDE E NA ECONOMIA	20
4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS.....	24
4.1 DADOS DE FROTA	25
4.2 CALCULO DE EMISSÕES DE CO2	28
4.3. COMPARAÇÃO QUANTITATIVA DE EMISSÕES	33
4.4 IMPACTO NA SAÚDE.....	38
5. PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO.....	43
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
7. CONCLUSÕES	53
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

Os séculos de XV até XIX foram marcados por um início da evolução dos meios de transporte, o que impulsionou o comércio global passando de veículos terrestres limitados para rotas marítimas mundiais. Ademais, tem-se que as revoluções industriais no final do século XIX introduziram inovações como a máquina a vapor e a ferrovia que encurtaram as distâncias e iniciou um processo de globalização mais acelerado.

Porém, foi só no século XX com a terceira revolução industrial e o desenvolvimento rodoviário e aéreo que ampliaram ainda mais a conectividade global facilitando o transporte de mercadorias, produtos, dados e pessoas, desempenhando um papel fundamental na complexa globalização atual.

Atualmente é muito sentido esse grande impulso no processo de globalização, extremamente aliado ao desenvolvimento dos sistemas de telecomunicações, os veículos cada vez mais geram a chamada compressão do tempo e do espaço, podendo viajar com mais facilidade e reduzindo custos.

Com a pré-avaliação dos dados do transporte aéreo e rodoviário no país, nota-se que, existe uma frota total de veículos em circulação de mais de 100 milhões em 2023, segundo dados do Ministério do Transporte. Além disso, a publicação da Assessoria de Comunicação Social da ANAC relatou que 67,4 milhões de indivíduos foram transportados em território nacional.

Destarte, a partir da Conferência de Estocolmo nos anos 70, na qual ocorreu o reconhecimento do problema ambiental, surgiu uma crescente conscientização sobre as mudanças climáticas. Nos tempos atuais, ocasiona uma análise crítica em relação a emissão de gases de efeito estufa em particular o dióxido de carbono, que está desempenhando um papel central no aquecimento global.

A partir disso, tem-se então o surgimento de um dos problemas mais desafiadores da Engenharia Civil moderna, em foco a área de transportes, “Mobilidade Sustentável”. Para efeito inicial de comparação tem-se que o transporte aéreo apesar de representar uma parcela menor das viagens apresenta os maiores fatores de emissões de CO₂ por unidade de distância percorrida, devido à queima do querosene de aviação altamente poluentes. Enquanto isso, temos que, o transporte rodoviário com sua extensa rede e uso frequente acumula emissões significativas ao longo das estradas do Brasil.

Diante o problema apresentado, esta pesquisa se torna justificada na necessidade de compreender as emissões de dióxido de carbono identificando seus principais impulsionadores

e avaliando seus efeitos na sociedade e na economia do Brasil. Essa análise se torna ainda mais crítica em um momento em que o mundo se volta para a preocupação das mudanças climáticas e a transição para sistemas de mobilidade urbana mais sustentáveis.

Além disso o estudo propõe a realização de uma comparação abrangente entre os modos de transporte aéreo e rodoviário oferecendo *insights* valiosos que podem orientar políticas públicas, decisões empresariais e iniciativas de sustentabilidade. De fato, este trabalho também busca fornecer estratégias eficazes de mitigação das emissões de CO₂.

2. OBJETIVO

Este estudo tem como o objetivo comparar as emissões de CO₂ no transporte aéreo e rodoviário no Brasil identificando fatores-chave, avaliando relação direta de saúde com emissões de CO₂, impactos socioeconômicos e propondo estratégias de redução.

3. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

3.1 PRINCIPAIS FATORES DE EMISSÕES DE CO₂

Tratando-se de fatores de emissões de CO₂, tem-se que o setor de transporte no Brasil ou em nível global está desempenhando um papel cada vez mais de destaque. Estas questões estão gerando uma preocupação significativa devido ao impacto que estão ocasionando nas mudanças climáticas em todo o mundo.

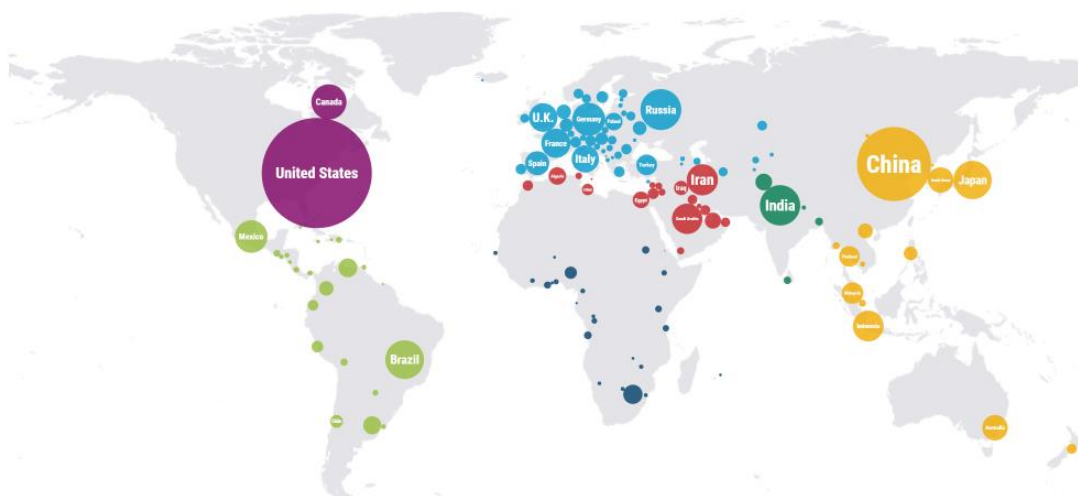
De fato, tem-se que o setor de transporte mundial desempenha um papel significativo nas emissões globais de CO₂. Para nível inicial de comparação pode ser considerado que aproximadamente 20% das emissões globais de CO₂ são atribuídas ao setor de transportes no mundo (IPEA, 2011).

De maneira exemplificativa, num contexto brasileiro o setor de transporte contribuiu com cerca de 9% das emissões totais de CO₂ no país no ano (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2011).

As emissões de CO₂ no setor de transporte têm múltiplas matrizes energéticas, com fatores de emissões diferentes, isso inclui as emissões dos escapamentos de veículos, produção de combustíveis fósseis como gasolina e diesel, logística de distribuição desses combustíveis, a construção e manutenção de infraestrutura rodoviária e a logística de transporte de mercadorias.

Para fim de análise, é importante destacar que quando se tratando de emissões de CO₂ no Brasil, a matriz energética possui uma característica favorável em relação a outras nações pois a grande maioria da energia nacional é proveniente de fontes de baixa emissão de carbono, como a hidroeletricidade. Isso significa que quando comparamos as emissões do setor de transporte com países onde a matriz energética é dominada por combustíveis fósseis as emissões no Brasil tendem a ser relativamente menores, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Emissão de CO₂ no mundo pela matriz de mobilidade.



Fonte. Shiyang Wang, 2019.

Em uma análise prática identifica-se os principais tipos de combustíveis empregados no Brasil tanto no setor rodoviário quanto na aviação. No transporte rodoviário destaca-se principalmente a gasolina, o diesel, o biodiesel, o etanol, o GNV e a eletricidade. Enquanto na aviação o combustível predominante é o querosene de aviação. Para simplificar os cálculos neste trabalho, vamos nos concentrar apenas na avaliação das emissões de CO₂ relacionadas à gasolina, etanol, diesel, querosene da aviação.

Em relação ao álcool como combustível é importante considerar que as emissões provenientes da queima no motor podem ser compensadas parcialmente quando analisado a cadeia de suprimentos pelas absorções de carbono durante o cultivo da cana de açúcar. No entanto é fundamental observar que a emissão de gases de efeito estufa associadas aos processos de preparo da terra, transporte, produção e distribuição do álcool não se enquadram na categoria de energia renovável.

Embora o transporte aéreo seja responsável por uma das menores parcelas de emissões de CO₂ quando comparado a outras fontes é importante ressaltar que suas emissões são particularmente prejudiciais em termos de impacto ambiental. Essa peculiaridade decorre do fato de que os poluentes liberados pelas aeronaves têm o potencial de amplificar os efeitos do dióxido de carbono na atmosfera. Isso ocorre porque essas emissões acontecem em altitudes elevadas especificamente na alta troposfera e na baixa estratosfera. Essa localização na atmosfera significa que esses poluentes afetam diretamente a concentração de gases de efeito estufa contribuindo para a intensificação do fenômeno do aquecimento global.

Seguindo para um dos pontos principais para mensurar as emissões de CO₂, pode-se utilizar duas abordagens principais para calcular as emissões de CO₂ no transporte: *Top-Down* e *Bottom-Up*.

A abordagem *Top-Down* geralmente se baseia em dados macroeconômicos, estatísticas de consumo de combustíveis, vendas de veículos e outras informações de alto nível disponíveis a partir de fontes governamentais e organizações internacionais. Não é atribuída a uma única pessoa ou grupo.

A abordagem *Bottom-Up* é frequentemente associada a especialistas em engenharia de transporte, cientistas ambientais e pesquisadores que desenvolveram métodos para coletar e analisar dados detalhados sobre veículos, padrões de condução e emissões veiculares.

- **Método *Top-Down***

O método *Top-Down* discorre de uma abordagem que se concentra na estimativa das emissões totais de CO₂ no setor de transporte a partir de fontes de dados macroeconômicas e de uso de energia. As principais fontes de dados usadas nesse método incluem dados nacionais de consumo de combustível, vendas de veículos, quilometragem média por veículo e eficiência energética média. Esses dados são então usados para calcular as emissões de CO₂ em nível nacional ou regional.

Uma das principais vantagens do método *Top-Down* é sua capacidade de fornecer uma visão geral rápida das emissões de CO₂ no transporte. No entanto, esse método não oferece detalhes sobre fontes específicas de emissões, tipos de veículos ou tecnologias estão sendo aplicadas.

- **Método *Bottom-Up***

O método *Bottom-Up* é uma abordagem mais detalhada que se concentra na medição das emissões de CO₂ a partir de fontes específicas, como por exemplo, diferentes modos de transporte, tipos de veículos e tipos de combustível. Esse método envolve a coleta de dados detalhados como eficiência de combustível de veículos individuais, padrões de condução e atividades de transporte.

As principais fontes de dados no método *Bottom-Up* incluem registros de veículos, dados de consumo de combustível, padrões de viagem, manutenção e registros de emissões veiculares. Essas informações são usadas para calcular as emissões de CO₂ com um alto grau de precisão em níveis locais, regionais e nacionais.

Uma das vantagens do método *Bottom-Up* é sua capacidade de identificar fontes específicas de emissões e avaliar o impacto de tecnologias de redução de emissões. No entanto, ele é mais complexo do que o método *Top-Down* e requer uma coleta de dados mais detalhada.

Para os cálculos de emissões de gases de efeito estufa pelo método *Bottom-Up* utiliza-se alguns procedimentos a mais do método *Top-Down*, desde que hajam dados locais confiáveis sobre a tecnologia, como qualidade do combustível, consumo, quilometragem, fatores de emissão e estado da frota avaliada.

Os dois métodos são usados em conjunto para fornecer uma imagem completa das emissões de CO₂ no transporte. A abordagem *Top-Down* é útil para estimar as emissões totais, enquanto a abordagem *Bottom-Up* fornece informações detalhadas sobre fontes específicas de emissões e permite o desenvolvimento de estratégias de redução de emissões mais eficazes.

Precisa-se entender a porcentagem que cada combustível tem participação nos modais de transporte analisado, com isso foi construído a tabela 1 através dos dados obtidos na CETESB sobre emissões veiculares no estado de São Paulo.

Tabela 1. Distribuição de veículos por tipo de combustível no estado de SP.

Categoria		Combustível	Estado de São Paulo	Macro-metrópole	Município de São Paulo	RMSP	RMC	RMBS	RMVP	RMSO	RMRP
Automóvel		Gasolina C.	3.153.818	2.517.815	1.123.667	1.737.654	238.735	75.698	147.644	132.959	92.213
		Etanol Hid.	258.559	166.386	71.130	107.020	18.723	2.849	10.491	10.716	14.156
		Flex-fuel	6.789.983	5.295.105	2.147.287	3.408.601	585.590	220.244	339.512	312.065	247.635
Comercial Leve		Gasolina C.	583.430	480.510	237.681	337.421	43.781	17.215	26.129	22.220	17.578
		Etanol Hid.	25.103	15.688	6.367	9.577	1.767	411	1.026	1.109	1.602
		Flex-fuel	949.552	684.639	264.376	415.113	82.671	24.402	46.056	47.028	41.189
		Diesel	413.733	290.136	119.757	185.679	31.834	8.525	18.306	17.928	19.368
Caminhões	Semileves	Semileves	36.022	24.386	7.035	14.118	2.843	1.150	1.476	1.915	1.720
	Leves		114.577	77.327	22.499	44.814	9.116	3.619	4.554	6.044	5.557
	Médios		65.931	44.699	12.936	25.909	5.190	2.101	2.676	3.510	3.155
	Semipesados		113.330	76.987	22.738	44.969	9.254	3.527	4.369	5.847	5.515
	Pesados		118.826	80.509	23.694	46.920	9.738	3.699	4.523	6.150	5.786
Ônibus	Urbanos	Diesel	63.817	49.941	20.304	33.776	5.428	1.777	2.923	2.587	2.061
	Micro-ônibus		14.393	11.393	4.572	7.704	1.245	404	688	580	439
	Rodoviários		28.604	21.921	9.026	14.874	2.339	768	1.260	1.144	983
Motocicletas		Gasolina C.	1.968.248	1.341.128	427.123	738.136	143.424	101.264	106.292	105.331	88.160
		Flex-fuel	597.269	343.958	77.560	143.907	44.551	37.834	37.191	32.655	40.855
Total			15.295.195	11.522.528	4.597.752	7.316.192	1.236.229	505.487	755.116	709.788	587.972

Fonte: CETESB. EMISSÕES VEICULARES NO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016.

Vale ressaltar que a tabela analisada é um estudo realizado pela CETESB em micros-regiões, para ampliar a análise nesse relatório será explodido para todo o país o que pode resultar em um erro de 0,02% (Comento, 2023). Partindo do pressuposto destes dados, foi realizado a

segmentação e cálculo da porcentagem de cada um dos usos de combustíveis como apresentado na tabela 2;

Tabela 2. Porcentagem de uso de combustível.

Categoria		Combustível	Estado de São Paulo	Porcentagem	PORCENTAGEM DE USO DE COMBUSTIVEL
Automóvel		Gasolina C.	3.153.818	30,91%	30,91%
		Etanol Hid.	258.559	2,53%	2,53%
		Flex-fuel	6.789.983	66,55%	66,55%
Comercial Leve		Gasolina C.	583.430	29,59%	29,59%
		Etanol Hid.	25.103	1,27%	1,27%
		Flex-fuel	949.552	48,16%	48,16%
		Diesel	413.733	20,98%	20,98%
Caminhões	Semileves	Diesel	36.022	8,03%	100,00%
	Leves		114.577	25,54%	
	Médios		65.931	14,69%	
	Semipesados		113.330	25,26%	
	Pesados		118.826	26,48%	
Ônibus	Urbanos	Diesel	63.817	59,75%	100,00%
	Micro-ônibus		14.393	13,47%	
	Rodoviários		28.604	26,78%	
Motocicletas		Gasolina C.	1.968.248	76,72%	76,72%
		Flex-fuel	597.269	23,28%	23,28%

Fonte: DADOS CETESB. EMISSÕES VEICULARES NO ESTADO DE SÃO PAULO, 2016.

3.2 MUDANÇAS CLIMATICAS RELACIONADA AO TRANSPORTE

É essencial, dentro das mudanças climáticas destacar a Conferência de Estocolmo ocorrida em 1972, que se tornou um momento fundamental na história das preocupações ambientais globais. Neste evento várias delegações se reuniram para discutir questões abrangentes desde a poluição do ar, da água e a degradação do solo até a conservação da biodiversidade e a saúde ambiental. Como resultado a conferência deu-se origem à Declaração sobre o Meio Ambiente Humano e ao Plano de Ação Global, enfatizando a necessidade de proteger o meio ambiente e promover o desenvolvimento sustentável.

Tem-se o efeito estufa que é um fenômeno natural no qual gases atmosféricos retêm parte do calor do sol, mantendo a Terra em condições adequadas para a vida. No entanto a atividade humana relacionada ao transporte especialmente com a queima de combustíveis fósseis tem intensificado esse processo. O aumento do efeito estufa tem levado ao aquecimento

global, derretimento das calotas polares e das geleiras, aumento do nível do mar, eventos climáticos extremos, acidificação dos oceanos, alterações nos padrões de precipitação, perda de biodiversidade, impactos na agricultura e mudanças nos ecossistemas terrestres.

Essas mudanças climáticas têm impactos profundos na sociedade, economia e meio ambiente, exigindo ações para mitigar o efeito estufa e suas consequências. Seguindo esse intuito, tem-se algumas ações que estão em alta para que ocorra o abrandamento de emissões pelo setor de transporte em todo o mundo.

Partindo disso, temos que a empresa Clean Sky, fundada em 2008 pela União Europeia, é uma parceria público/privada que busca impulsionar a inovação e o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis na indústria da aviação. Seu principal objetivo é reduzir as emissões de dióxido de carbono, o ruído e a poluição causados pela aviação, tornando as aeronaves mais eficientes e *friendly* ao meio ambiente. Ao promover o desenvolvimento de tecnologias, como aerodinâmica avançada, motores eficientes e sistemas mais leves a Clean Sky visa fortalecer a competitividade da indústria aeroespacial europeia, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do impacto ambiental da aviação.

Com o propósito de combater o aumento da poluição no acordo climático do ano de 2018 das Nações Unidas, o Brasil se comprometeu a reduzir suas emissões de gases do efeito estufa em 43% até 2030. Tendo em vista que o setor de transporte é responsável por uma parte significativa das emissões de dióxido de carbono, a eletrificação dos meios de transporte emerge como uma opção viável para atingir esse objetivo. No entanto para que a eletrificação generalizada dos transportes produza resultados eficazes a eletricidade usada deve ser gerada a partir de fontes de energia limpa e renovável.

Além disso, políticas implementadas nos últimos anos, visam diretamente a questão da poluição procurando adotar medidas para mitigar as emissões de poluentes. Entretanto muitas outras políticas com diferentes objetivos acabaram gerando consequências adversas do ponto de vista ambiental. Entre elas, políticas que visavam a redução do preço da gasolina ou a diminuição de impostos sobre automóveis e motocicletas.

Algumas das políticas adotadas nos últimos anos que reduziram as emissões foram:

- Regulamentação das emissões de veículos a motor: O Proconve, lançado em 1986, reduziu as emissões de poluentes veiculares em mais de 90% (IBAMA, 2022). Entretanto, o aumento rápido na frota de veículos desafia a manutenção desses ganhos ambientais.

- Promoção de fontes de energia mais ambientalmente amigáveis: A introdução de combustíveis mais limpos, como o álcool no Brasil, reduziu emissões veiculares. A mistura de álcool na gasolina e veículos bicomcombustíveis contribuíram para essa redução.
- Monitoramento e avaliação de veículos através de inspeções obrigatórias: A manutenção regular de veículos é crucial para controlar as emissões de poluentes. Embora o Código de Trânsito Brasileiro tenha exigido inspeção veicular desde 1997, sua implementação nacional foi adiada, exceto em São Paulo e Rio de Janeiro.

Algumas das políticas adotadas nos últimos anos que aumentaram as emissões foram:

- Redução de custos da gasolina: Nos últimos 30 anos, a taxa de inflação do diesel superou consideravelmente a da gasolina, resultando em aumentos nos custos do transporte público, tornando a gasolina mais atrativa para veículos pessoais. Isso levou à sua crescente popularidade.
- Incentivos à aquisição de veículos pessoais: Nos últimos dez anos, a frota de carros e motos cresceu nos últimos anos, devido ao crédito fácil e aumento da produção. Políticas tributárias protegeram a indústria em crises.
- Planejamento do uso do solo e desenvolvimento urbano: A morfologia urbana e o planejamento influenciam o transporte e as emissões. Baixa densidade leva a transporte público ineficiente e uso de carros. Concentração de atividades e baixa densidade residencial causam congestionamentos e poluição do ar.

Ademais, com a evolução da tecnologia e inteligências artificiais podemos estimar a redução de emissões através de uma gestão logística mais eficiente. Atualmente há várias iniciativas disponíveis no mercado para reduzir emissões oferecendo benefícios econômicos tendo em vista que melhoram a eficiência e produtividade do transporte. De fato, muitas dessas medidas também contribuem positivamente para a segurança das viagens, reduzindo o risco de acidentes.

Vale ressaltar que um ponto muito importante é que diante as mudanças climáticas se acentuando, acarreta no impacto significativo no setor de transporte em todo o mundo. O aumento das temperaturas, eventos climáticos extremos e elevação do nível do mar afetam a infraestrutura de transporte, levando a danos nas estradas, pontes e ferrovias. Além disso, o

aumento da frequência e gravidade de eventos climáticos, como tempestades e inundações, perturba os sistemas de transporte, causando atrasos e interrupções.

3.3 IMPACTOS NA SAÚDE E NA ECONOMIA

Atualmente a mobilidade motorizada a combustão está se tornando mais participativa nos deslocamentos cotidianos da população respondendo por grande parte das emissões de poluentes centros urbanos por todo o país. De maneira analítica, pode-se caracterizar de duas maneiras as poluições causadas por veículos automotores, seguindo de acordo com a abrangência dos seus impactos ambientais, são eles: Os poluentes globais são os gases que chegam na atmosfera e que conseguem contribuir para o aquecimento global. Tem-se também os poluentes locais, estes somente afetam os locais e as áreas regionais de operação do transporte. Muitas vezes baseados em queima de alguns tipos de combustíveis fósseis se tornam responsáveis pela emissão de alguns poluentes que se tornam nocivo ao ecossistema inserido.

Destacam-se também o monóxido de carbono, alguns hidrocarbonetos, materiais particulados e os óxidos de enxofre. Analisando a tabela 3 pode ser visualizado alguns dos efeitos nocivos à saúde, que a alta concentração desses poluentes pode ocasionar.

Tabela 3. Alta concentração de gases e danos causados.

Gases Poluentes	Impacto Ambiental
CO	Causa sintomas como tonturas, dores de cabeça, náuseas e diminui oxigenação gerando envenenamento em altas concentrações.
HC	Possibilidades de causar problemas respiratórios e cardiovasculares, potencializando fatores cancerígenos.
MP	Pode penetrar dentro do sistema respiratório causando irritações no organismo, asma e câncer de pulmão.
SOX	Responsável por formar a chuva ácida, causando degradação a infraestrutura das cidades e organismos vivos.

Fonte. Ministério da Saúde, Brasil, 2023.

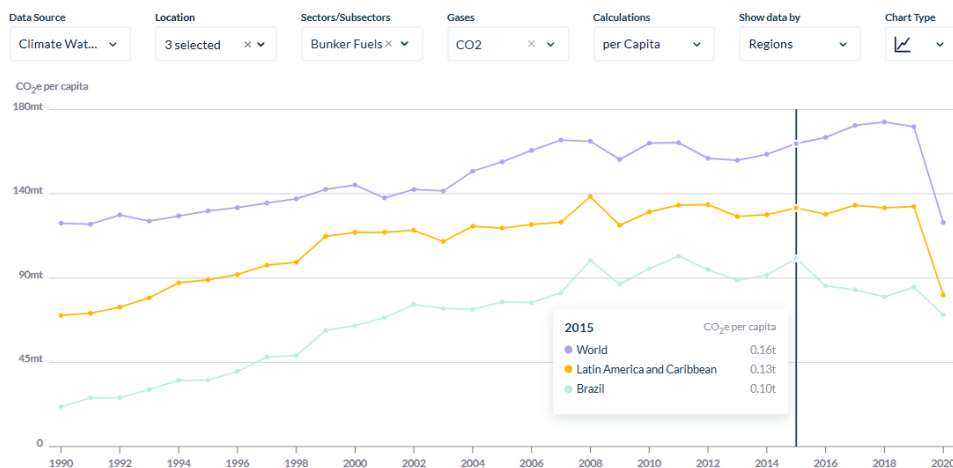
A poluição do ar representa atualmente o maior risco ambiental para saúde. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), são sete milhões de mortes por ano devido a problemas respiratórios causados por poluentes, como asma e o câncer de pulmão. Segundo o Ministério da Saúde, 6,4 milhões de pessoas acima de 18 anos sofrem com asma. Os sinais de doenças respiratórias são falta de ar, chiado no peito e tosse constante. Além da asma, rinite

alérgica, sinusite e bronquite causam impacto nas atividades cotidianas como praticar exercícios físicos, dormir e trabalhar.

O WRI Brasil trabalha especificamente no contexto brasileiro, abordando questões como mudanças climáticas, uso sustentável da terra, mobilidade urbana, energia renovável e outros temas relacionados ao desenvolvimento sustentável. A organização realiza pesquisas, fornece análises e desenvolve iniciativas práticas para auxiliar o Brasil na transição para uma economia mais sustentável e resiliente.

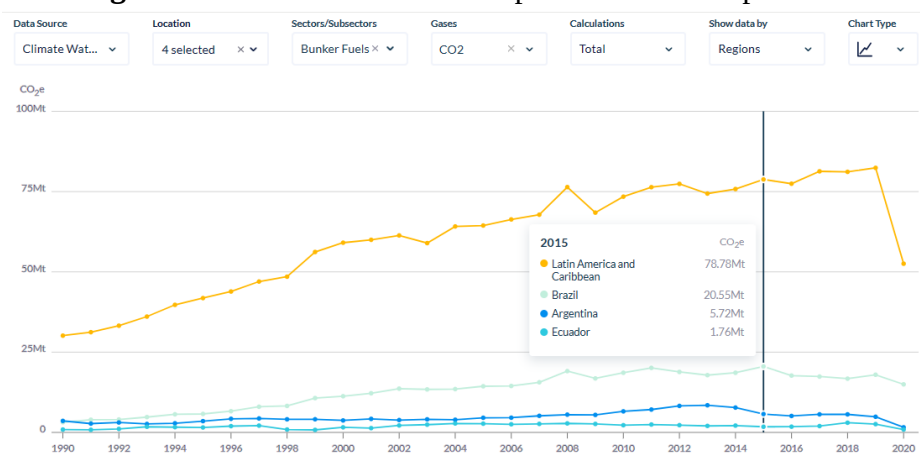
Conforme demonstrado na figura 2, é possível analisar a trajetória das emissões de CO₂ no Brasil provenientes do uso de combustíveis pesados utilizando métricas per capita. Já na figura 3 e 4 temos os gráficos demonstrando valores totais de emissões por combustíveis pesados e pelo setor energético. Essas informações serão fundamentais para validar os cálculos apresentados neste relatório e estabelecer uma base sólida de pesquisa para comparações com o aumento de doenças no mesmo período.

Figura 2. Emissões de dióxido de carbono per capita por combustível pesado.



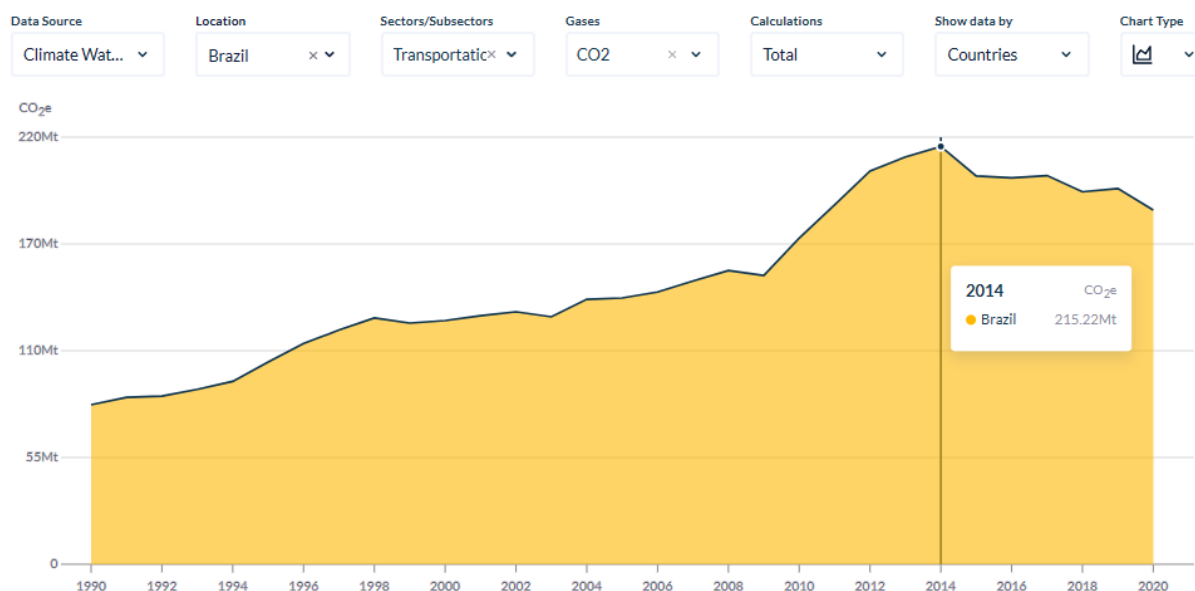
Fonte: World Resources Institute - Brasil. (2020). Global Historical Emissions.

Figura 3. Emissões total de CO2 por combustíveis pesados.



Fonte: World Resources Institute - Brasil. (2020). Global Historical Emissions.

Figura 4. Emissões total de CO2 pelo setor de transportes.



Fonte: World Resources Institute - Brasil. (2020). Global Historical Emissions.

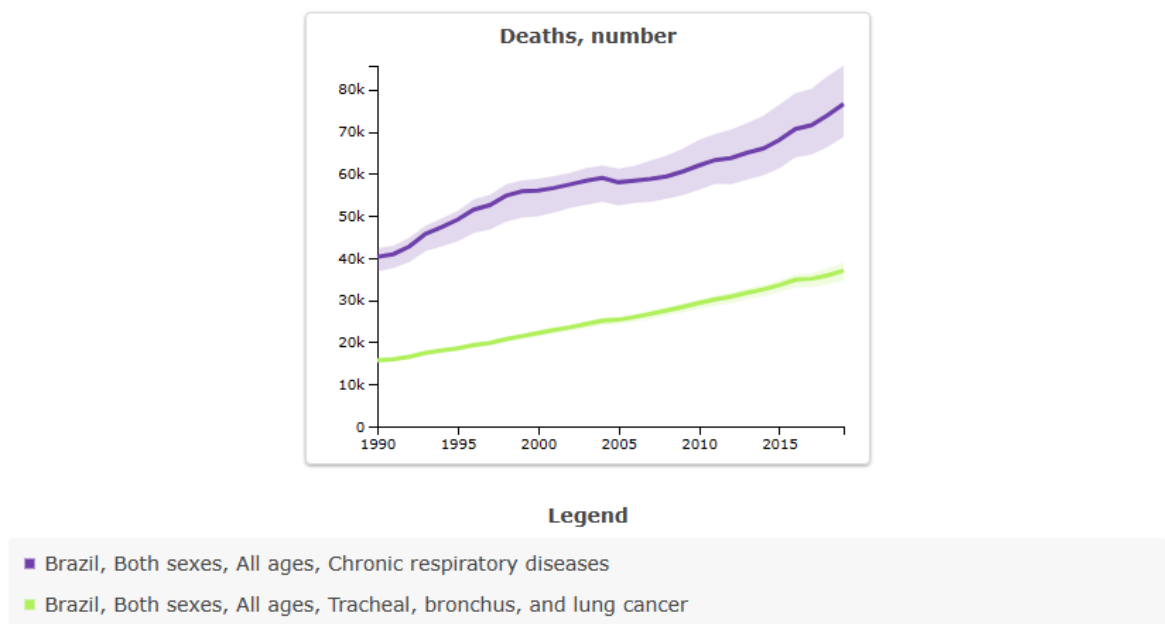
Vale ressaltar que ambas figuras apresentam dados *out of line*, pois estão num cenário de pandemia global de Covid-19 no ano de 2020, no qual limitou a emissões de CO₂ por razões diversas.

Tem-se também, o *Global Burden of Disease*, conduzido pelo *Institute for Health Metrics and Evaluation* (IHME), é uma iniciativa global que visa medir a carga global de doenças e oferecer informações abrangentes sobre a saúde global, o IHME é uma organização de pesquisa em saúde global sediada na Universidade de Washington.

Com base nisso, como pode-se analisar na figura 5, é possível retirar os dados necessários para determinar o número de óbitos por causas respiratórias em todo o Brasil.

Estes dados são extremamente importantes pois geram bases de análises de desenvolvimento dos casos, com isso pode ser comparado com valores e percentuais da literatura afim de chegar a algumas conclusões iniciais de estudo.

Figura 5. Número total de mortes por causas respiratórias.



Fonte: *Global Burden of Disease* - IHME. (2020). GBD Results. Disponível em <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/>. Acessado em 09/11/2023.

Analisando os números brutos percebe-se que ambos os gráficos se mostram em crescimento, ao mesmo tempo que a porcentagem de usuários de tabagismo vem diminuindo em todo o Brasil. A partir disso se mostra lógico a comparação deste estudo de forma direta de ambos os gráficos.

4. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS

Partindo da necessidade de desenvolvimento de dados, nesta seção tem-se o intuito de delinear o desenvolvimento de quatro modelos cruciais para a compreensão abrangente de uma análise comparativa de emissões de CO₂. Será identificado a frota de veículos nacionais de ambos os modais, realizar os cálculos provenientes das emissões de CO₂, realizar uma análise de custo gerado para saúde nacional e por fim trazer ideias de mitigação para o problema avaliado. Cada modelo aborda aspectos específicos, proporcionando uma visão holística do cenário atual no Brasil e gerando grandes possibilidades de análise de dados.

Para o um melhor desenvolvimento do seguinte projeto de trabalho de conclusão de curso a metodologia de desenvolvimento seguirá um passo a passo de elaboração e apresentação de resultados.

O processo de avaliação e mitigação das emissões de CO₂ no transporte no Brasil compreende diversos passos essenciais. Inicialmente, é conduzida uma análise detalhada das emissões, envolvendo a coleta de dados sobre frotas de veículos e emissões de CO₂ nos setores rodoviário e aéreo. Modelos de cálculo especializados são aplicados para quantificar precisamente essas emissões sendo elas representadas nas equações seguinte;

$$\textit{Emissões Top Down} = \textit{Consumo de Combustível Total} \times \textit{Fator de Emissão} \quad (\text{Eq.1})$$

$$\textit{Emissão Bottom Up} = \textit{Fator de Emissão} \times \textit{Quantidade de Energia Consumida} \quad (\text{Eq. 2})$$

Para calcular através de quilometragens anuais pode-se utilizar a seguinte equação:

$$ECO_2 = F \times FE \times KM_{MED} \quad (\text{Eq. 3})$$

- ECO_2 = Emissão de CO₂
- F = Número da Frota
- FE = Fator de Emissão de CO₂
- KM_{MED} = Distância média percorrida no ano

Em seguida, são identificados os principais fatores contribuintes por meio da análise de literatura acadêmica e relatórios setoriais. O terceiro passo aborda os impactos socioeconômicos, incluindo a avaliação dos custos de saúde relacionados à qualidade do ar provenientes das emissões de CO₂ no transporte. Para identificar os insumos necessários para elaborar os modelos deste relatório, foi pesquisado a situação brasileira em dois institutos de referência em dados: o WRI Brasil e o GBD do *Institute for Health Metrics and Evaluation*.

A quarta etapa envolve uma comparação quantitativa das emissões, considerando distâncias percorridas, número de passageiros e eficiência dos veículos nos modos rodoviário e aéreo. Por fim, são desenvolvidas propostas de mitigação, que incluem a revisão de tecnologias e regulamentações relevantes, análise de estudos de caso internacionais e a formulação de recomendações específicas considerando aspectos tecnológicos, regulatórios e urbanos. Esse processo integrado busca promover a sustentabilidade no transporte, reduzindo as emissões de CO₂ e mitigando impactos socioeconômicos.

4.1 DADOS DE FROTA

Para o início do desenvolvimento do modelo deste trabalho, deve-se analisar os insumos suficientes para os cálculos que serão efetuados. Tem-se que a frota de veículos rodoviários e aeroviários é um componente vital da infraestrutura do país, impactando diretamente diversos setores e possibilitando o atual estudo.

A partir disso, utiliza-se a consulta de dados de frota rodoviária de setembro de 2023 provenientes do Ministério do Transporte a fim de utilizar uma base segura.

Os dados, por sua vez, são apresentados em várias classificações, de forma a conseguir unificar em categorias-chave com valores de fatores de emissões próximos, irá ser simplificado a frota para o seguinte formato:

- **Automóvel:** Automóvel, caminhonete, camioneta, utilitário.
- **Ônibus:** Bonde, micro-ônibus, ônibus.
- **Caminhão:** Caminhão, caminhão trator, chassi plataforma, reboque, semi-reboque, trator esteira, trator rodas.
- **Motocicleta:** Ciclomotor, motocicleta, motoneta, sidecar, triciclo.
- **Outros:** outros.

Através disso, foi construído uma tabela com os dados consolidados, como observado através da tabela 4.

Tabela 4. Relação frota rodoviária x unidade federativa – Set/2023.

Unidades Federativas	TOTAL	AUTOMÓVEL	ONIBUS	CAMINHÃO	MOTOCICLETA	OUTROS
Brasil	118.090.209	76.606.681	1.145.765	7.499.559	32.804.469	33.735
Norte	6.609.028	2.889.795	67.200	402.882	3.248.082	1.069
Nordeste	20.974.451	10.222.520	247.358	1.048.144	9.453.982	2.447
Sudeste	56.312.433	40.318.535	557.065	3.082.410	12.345.479	8.944
Sul	22.912.795	16.300.594	179.569	1.932.756	4.481.015	18.861
Centro-Oeste	11.281.502	6.875.237	94.573	1.033.367	3.275.911	2.414

Fonte: Ministério do Transporte. Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - SET/2023.

De maneira complementar, foi observado a necessidade de tratar dados anteriores para entender a curva de crescimento do modal de transporte rodoviário no Brasil, gerando também previsão de crescimento futuro. Assim, foram criadas as tabelas 5 e 6;

Tabela 5. Relação frota rodoviária x unidade federativa – Jan/2005.

Unidades Federativas	TOTAL	Automóvel	Ônibus	Caminhão	Motocicleta	OUTROS
Brasil	39.428.025	28.953.552	495.851	2.772.809	7.201.849	3.818
Norte	1.344.893	723.111	20.216	107.216	494.195	154
Nordeste	4.856.217	3.047.860	77.918	315.899	1.414.044	492
Sudeste	21.308.822	16.659.992	274.672	1.270.896	3.101.010	2.180
Sul	8.612.707	6.292.768	86.769	795.675	1.436.876	553
Centro-Oeste	3.305.386	2.229.821	36.276	283.123	755.724	439

Fonte: Ministério do Transporte. Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - JAN/2005

Tabela 6. Relação frota rodoviária x unidade federativa – Set/2015.

Unidades Federativas	TOTAL	AUTOMÓVEL	ÔNIBUS	CAMINHÃO	MOTOCICLETA	OUTROS
Brasil	89.710.811	59.363.626	960.174	5.390.836	23.984.216	11.802
Norte	4.530.306	2.021.914	53.148	265.505	2.189.444	294
Nordeste	14.969.088	7.484.225	192.867	729.584	6.561.762	645
Sudeste	44.030.366	32.044.220	490.987	2.316.124	9.175.367	3.590
Sul	17.868.830	12.682.947	149.610	1.421.234	3.608.336	6.634
Centro-Oeste	8.312.221	5.130.320	73.562	658.389	2.449.307	639

Fonte: Ministério do Transporte. Frota de veículos, por tipo e com placa, segundo as Grandes Regiões e Unidades da Federação - Set/2015

Seguindo a mesma necessidade do sistema rodoviário necessita-se de informações consolidadas sobre a frota de aeronaves que estão em situação aero navegáveis no país. Para isso, utiliza-se as informações de dados disponibilizados e consolidados no site da Agência Nacional de Aviação.

Diante das informações retiradas do painel online da ANAC, em setembro de 2023, 2.009 aeronaves em reserva de marca, 15.352 aeronaves em situação aeronavegável, 5.690 não aeronavegáveis, sendo 577 aeronaves cadastradas em 2023 e 103 canceladas neste mesmo ano, considerando um total de 21.040 aeronaves com matrícula ativa. Dessas aeronaves em situação aeronavegáveis aproximadamente 529 se encontram em situação comercial de grandes companhias aéreas no país (AviaçãoComercial, 2023).

A partir dessas informações, é importante identificar e relatar qual a distância média que os veículos de ambos os modais percorrem no Brasil todos os anos, sendo elas;

- Automóvel: 12,5 x 1.000 km/ano (KBB Brasil, 2019)
- Ônibus: 73,5 x 1.000 km/ano (Ueda, 2011)
- Caminhões: 51,5 x 1.000 km/ano (Ueda, 2011)
- Motocicleta: 12 x 1.000 km/ano (Ueda, 2011)
- Outros: *Utilizaremos a média aritmética dos modais: 37,5 x 1.000 km/ano

Partindo da necessidade de encontro dos desempenhos médios das aeronaves na aviação brasileira, obtemos a seguinte tabela 7.

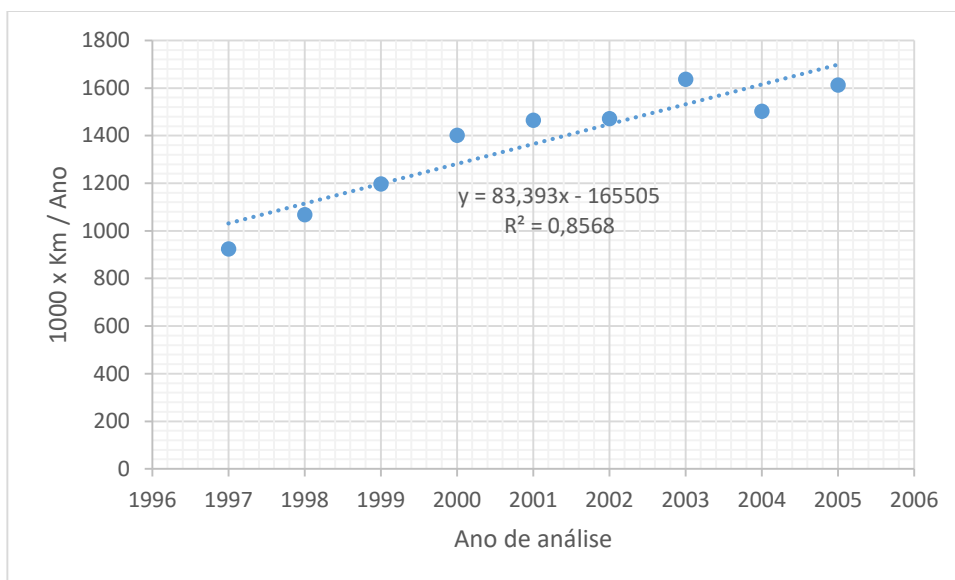
Tabela 7. Média do desempenho anual da aviação comercial brasileira

	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
GOL					1480	1735	2240	2180	2002
TAM	495	816	1130	1133	1521	1366	1141	1275	1807
VASP	1238	1307	1364	1832	1807	1794	1755		
VARIG	1040	1080	1098	1241	1050	990	1410	1052	1028
MÉDIA	924	1068	1197	1402	1465	1471	1637	1502	1612

Fonte. Diehl, 2010.

Com o intuito de gerar informações necessárias para entender o crescimento do desempenho médio anual da aviação foi construído um gráfico de dispersão traçando a linha de tendência entre os pontos avaliados, como apresentado na figura 6.

Figura 6. Gráfico de tendência desempenho anual da aviação.



Fonte. Adaptado de Diehl, 2010.

A obtenção dos dados permitiu a formulação de uma equação de desempenho, conforme exemplificado na Equação 4.

$$\text{Desempenho Médio} = 83,393x - 165505$$

(Eq. 4)

Legenda:

X = Ano de referência

Com isso para o ano de 2023 podemos considerar um desempenho médio da aviação civil como o apresentado na Equação 5.

$$\text{Desempenho Médio} = 83,393 * 2023 - 165505 = 3.200 * 1000 \text{ Km/Ano}$$

(Eq.5)

Assim, a partir da equação da reta de tendência, o desempenho médio a ser considerado neste estudo para cada avião em 2023 é de 3.200.000 quilômetros por ano.

4.2 CALCULO DE EMISSÕES DE CO2

Para determinar as liberações provenientes de diferentes fontes de energia para os modais de transporte rodoviário e aeroviário é essencial que seja possível adquirir as taxas de

emissão de CO₂ equivalentes durante a combustão de cada tipo de combustível no sistema de mobilidade, adicionadas às taxas de emissão de todo o setor logístico de produção e distribuição.

Iremos a partir disso projetar a emissão de CO₂ para os seguintes tópicos;

- **Emissão de CO₂ no sistema Rodoviário**

Com o objetivo de ampliar a análise em nível nacional utilizaremos os dados disponibilizados pelo Ministério do Transporte como ponto de referência que compreendem os números totais do sistema nacional de mobilidade. Através da equação 6, teremos a capacidade de obter informações mais precisas sobre a distribuição dos tipos de combustíveis utilizados pelos diversos meios de transporte no país. Na categoria "outros", a gasolina será exclusivamente adotada como fator de emissão devido à falta de informações detalhadas sobre os tipos específicos de transporte analisados.

Ademais, ao examinar os dados da literatura, em 2022, aproximadamente 126.504 veículos em circulação eram carros elétricos (IPEA, 2023). Essa constatação ressalta a crescente aceitação dos veículos elétricos como uma opção sustentável e eficiente no setor de transporte. A partir desses dados, procederemos com a segregação entre veículos a combustão e veículos elétricos no país.

Além disso, é relevante salientar que os veículos categorizados como caminhões e ônibus, devido a toda a frota operar exclusivamente com diesel, não requerem cálculos de segregação.

$$Veículo_i = \%UsoCombustível \times (Valor Bruto MT - Carros Elétricos) \quad (Eq. 6)$$

Legenda:

$Veículo_i$ = Matriz veículo analisada.

$\%UsoCombustível$ = Porcentagem de combustível utilizado na matriz veículo.

Valor Bruto MT = Valor nacional bruto pelo Ministério de Transporte.

Carros Elétricos = Quantidade de Carros Elétricos

- Automóvel

$$Automóvel_{Gasol} = 0,3091 \times (76.606.681 - 126.504) = 23.640.023 \text{ veículos} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$Automóvel_{Eta} = 0,0254 \times (76.606.681 - 126.504) = 1.942.596 \text{ veículos} \quad (\text{Eq.8})$$

$$Automóvel_{Flex} = 0,6655 \times (76.606.681 - 126.504) = 50.897.558 \text{ veículos} \quad (\text{Eq.9})$$

- Motocicletas

$$Motocicleta_{Gasol} = 0,7672 \times 32.804.469 = 25.167.589 \text{ veículos} \quad (\text{Eq.10})$$

$$Motocicleta_{Flex} = 0,2328 \times 32.804.469 = 7.636.880 \text{ veículos} \quad (\text{Eq.11})$$

A partir dos cálculos realizados, é possível criar a tabela 8 contendo as quantidades de veículos para cada tipo de combustível/fonte energética utilizado no transporte rodoviário brasileiro.

Tabela 8. Uso de categoria energética no transporte brasileiro.

Categoria	Combustível	Quantidade (Veículos)
Automóvel	Gasolina C.	23.640.023
	Etanol Hid.	1.942.596
	Elétrico	126.504
	Flex-fuel	50.897.558
Motocicletas	Gasolina C.	25.167.589
	Flex-fuel	7.636.880
Ônibus	Diesel	1.145.765
Caminhão	Diesel	7.499.559
Outros	Gasolina C.	33.735

Fonte: Próprio autor, 2023.

Com base na categorização completa da frota de veículos de acordo com o tipo de combustível utilizado, seguimos diante a necessidade de apresentar todos os índices de emissão

correspondentes a cada tipo de combustível. Nesse contexto, foram extraídos de diversas fontes literárias os dados relativos à emissão de CO₂ por quilômetro percorrido;

- Gasolina C: 0,224 Kg/Km (Cetesb, 2023)
- Motocicleta Gasolina: 0,054 Kg/Km (Cetesb, 2023)
- Motocicleta Flex: 0,047 Kg/Km (Cetesb, 2023)
- Etanol: 0,059 Kg/Km (Idesam, 2023)
- Diesel: 0,236 Kg/Km (Luiz Artur Pecorelli Peres, 2011)
- Flex: 0,143 Kg/Km (Cetesb, 2023)

De maneira a simplificar os cálculos e defesa desse estudo os carros elétricos serão considerados como tendo um fator de emissão de zero, pois a amostra atual no Brasil é pequena e há poucos estudos sobre o impacto ambiental, levando em conta o uso da matriz energética nacional para carregar esses veículos.

Dessa maneira, será empregado a metodologia de *Bottom Up* usando a equação 3 para calcular individualmente cada emissão com base na quantidade, desempenho e fator de emissão de cada um dos veículos identificado, como demonstrada na tabela 9.

Tabela 9. Emissões totais de CO₂eq no transporte rodoviário brasileiro.

Categoria	Combustível	Quantidade	Km médio/ano	Fator de Emissão Co ₂ eqxKg/km	Emissão KgxC ₂ eq	Emissão TonxC ₂ eq
Automóvel	Gasolina C.	23.640.022,71	12.500	0,224	66.192.063.589,96	66.192.063,59
	Etanol Hid.	1.942.596,50	12.500	0,059	1.432.664.915,65	1.432.664,92
	Elétrico	126.504,00	-	-	-	-
	Flex-fuel	50.897.557,79	12.500	0,143	90.979.384.555,88	90.979.384,56
Motocicletas	Gasolina C.	25.167.588,62	12.000	0,054	16.308.597.423,69	16.308.597,42
	Flex-fuel	7.636.880,38	12.000	0,047	4.307.200.536,12	4.307.200,54
Ônibus	Diesel	1.145.765,00	73.500	0,236	19.874.439.690,00	19.874.439,69
Caminhão	Diesel	7.499.559,00	51.500	0,236	91.149.640.086,00	91.149.640,09
Outros	Gasolina C.	33.735,00	37.500	0,224	283.374.000,00	283.374,00
Total		118.090.209,00	236.500		290.527.364.797,31	290.527.364,80

Fonte: Próprio autor, 2023.

Diante a apresentação dos seguintes dados será convertida a unidade de emissão de Toneladas de CO₂ equivalente (TonxCO₂eq) para Milhões de Toneladas de CO₂ equivalente (Milhões TonxCO₂eq). O fator de conversão é 1 milhão. Portanto, obtemos os seguintes valores de emissão de Co₂ representado na tabela 10;

Tabela 10. Emissões totais de CO₂eq no transporte rodoviário em milhões por tonelada.

Categoria	Combustível	Emissão MtxCO₂eq
Automóvel	Gasolina C.	66,19
	Etanol Hid.	1,43
	Elétrico	0,00
	Flex-fuel	90,98
Motocicletas	Gasolina C.	16,31
	Flex-fuel	4,31
Ônibus	Diesel	19,87
Caminhão	Diesel	91,15
Outros	Gasolina C.	0,28
Total		290,53

Fonte: Próprio autor, 2023.

- **Emissão de CO₂ no sistema Aeroviário**

Para início de cálculo precisa ser entendido a porcentagem que o combustível tem participação no modal aeroviário analisado, assim como exemplificado utilizando o modelo *Top-Down* para analisar de maneira macro.

Segundo o *IATA - Carbon Offset Program* de 2022, 1 kg de querosene de aviação é responsável pela emissão aproximada de 3,16 kg de dióxido de carbono (CO₂). Essa informação será utilizada como medida de conversão para poder atingir os valores de emissão por km rodado.

Além disso, a empresa de Pesquisa Energética prevê que a demanda nacional por querosene de aviação alcançará 6,8 bilhões de litros em 2023. Adicionalmente, conforme indicado por estudos experimentais, a densidade do querosene de aviação é medida em 798,0 kg/m³ (GONÇALVES IRC, 2018). Com base nessas informações, obtidas na literatura, já é possível estabelecer um valor inicial para a análise do sistema aeroportuário.

$$Combustivel\ Kg = \frac{6.800.000.000\ litros}{1000} \times 798,0 \frac{Kg}{m^3} = 5.426.400.000\ Kg$$

(Eq. 12)

Ao converter os valores para o peso em quilogramas do querosene de aviação chega a mensuração de consumo anual no Brasil de 5.426.400.000 quilogramas, é possível empregar a fórmula o fator de conversão apresentado pela *Carbon Offset Program* de 2022.

$$Emissão\ KgCo2Eq = 5.426.400.000\ kg \times 3,16\ CO2Eq = 17.147.424.000\ KgCo2Eq$$

(Eq. 13)

Por fim, utilizando esse valor, podemos dividir pelo número de veículos na frota aeronáutica ativa e pelo desempenho anual percorrido em quilômetros para determinar as emissões de CO₂ por quilômetro aproximadas.

$$Emissão\ de\ \frac{KgCo2Eq}{km}\ para\ QAV = \frac{17.147.424.000}{21.040 * 3.200 * 1000} = \frac{17.147.424.000}{67.328.000.000} = 0,255\ \frac{KgCO2Eq}{km}$$

(Eq. 14)

Portanto, concluí que, a cada quilômetro percorrido por uma aeronave utilizando querosene de aviação (QAV), ela gera em média, 0,255 KgCO₂Eq/km de emissões para o meio ambiente, vale ressaltar que foi utilizado a medida *Top-Down* que apresenta dados mais gerais de análise do que pelos métodos *Bottom-Up*, por isso pode existir uma diferença de confiabilidade entre os fatores de emissões da literatura e o calculado pelo método apresentado.

De fato, o fator de emissão da aviação calculado não se destoa dos valores encontrados na literatura para os outros tipos de combustíveis rodoviários e apresenta uma margem maior no valor do que até o diesel, como já esperado durante a análise de revisão bibliográfica, o que de certa maneira apoia o fato de utilizarmos este valor calculado

4.3. COMPARAÇÃO QUANTITATIVA DE EMISSÕES

Efetivamente, a partir do cálculo realizado anteriormente foi possível constatar que a malha rodoviária devido à sua considerável quantidade de veículos e ao acumulado médio de quilômetros percorridos anualmente abriga os maiores indicadores totais nesse contexto.

A partir disso destaca a notável quantidade de passageiros transportados anualmente no Brasil pelo setor aeroportuário. Apesar de apresentar um valor mais elevado de emissões por quilômetro percorrido, torna-se imperativo investigar se a expansão do uso de aeronaves no

país para viagens de longa distância resultaria em uma redução das emissões de CO₂ per capita ou totais, comparativamente a outros modos de transporte, como o rodoviário.

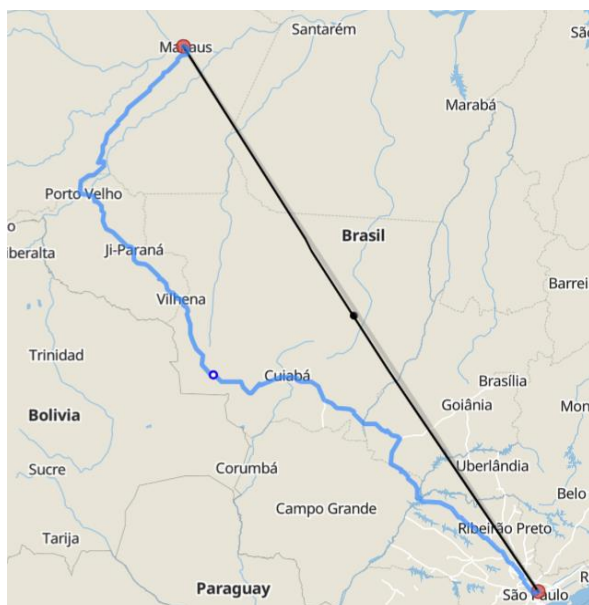
Se este estudo for validado, poder ser adotado uma medida de promover a expansão do uso de veículos aéreos como uma medida mitigatória para reduzir as emissões de CO₂ estimulando o setor aeroportuário e obtendo incentivos para a diminuição dos custos das passagens aéreas, resultando na diminuição de viagens de carro a longas distância.

Neste contexto, examinaremos de forma comparativa três itinerários presentes no país: Manaus para São Paulo, São Paulo para o Rio de Janeiro e Porto Alegre para São Paulo, a fim de realizar comparações de emissão de CO₂. A quantidade de passageiros por modalidade foi ajustada conforme o máximo padrão estabelecido para cada categoria. No caso das aeronaves, foi considerado um total de 186 passageiros, correspondente à capacidade da aeronave 737 MAX 8 da Gol, a maior que consegue atender a ambos os trajetos analisados.

- **Análise trecho – Manaus (MAO) x São Paulo (GRU)**

Conforme dados obtidos do pt.distance.to em 2023. A rota de condução aeroviária entre os pontos em questão é de 2.689,76 km, estende-se para 3.944,83 km para o rodoviário no mesmo período e fonte. A visualização detalhada dessas distâncias pode ser observada na figura 7 enquanto os valores calculados estão apresentados na tabela 11. É importante ressaltar que essas medições foram realizadas utilizando a abordagem *Bottom-Up*.

Figura 7. Representação trajeto rodoviário (azul) x aeroviário (preto) – MAO x GRU.



Fonte: pt.distance.to, 2023.

Tabela 11. Cálculo das emissões totais e per capita – MAO x GRU.

Categoria	Combustível	Quantidade (Und.)	Percurso (Km)	Fator de Emissão Co2eqxKg/km	Emissão KgxC02eq	Quantidade máxima transportado	Emissão Per Capita.
Automóvel	Gasolina C.	1	3.944,83	0,224	883,64	5	176,73
	Etanol Hid.	1	3.944,83	0,059	232,74	5	46,55
	Flex-fuel	1	3.944,83	0,143	564,11	5	112,82
Motocicletas	Gasolina C.	1	3.944,83	0,054	213,02	2	106,51
	Flex-fuel	1	3.944,83	0,047	185,41	2	92,70
Ônibus	Diesel	1	3.944,83	0,236	930,98	50	18,62
Caminhão	Diesel	1	3.944,83	0,236	930,98	2	465,49
Aeroviário	QAV	1	2.689,76	0,255	685,89	186	3,69

Fonte: próprio autor, 2023.

Conforme cálculo realizado na calculadora de emissões co2legal esta rota emite cerca de 508 KgxC02eq, a partir disso foi possível obter a taxa de erro esperada do cálculo;

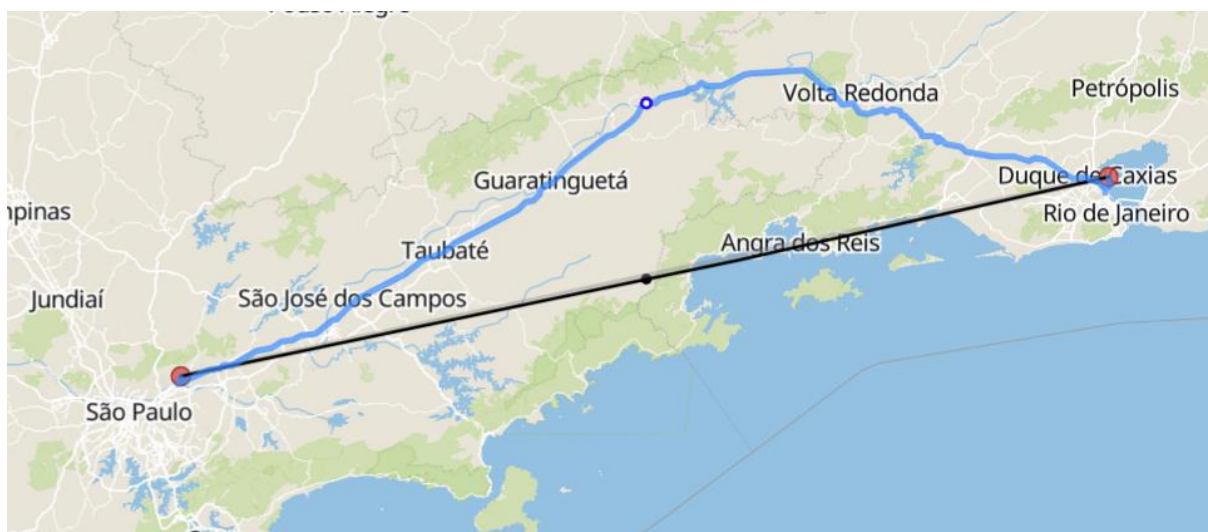
$$\text{Taxa de Erro Emissão CO2} = \frac{(508 - 685,89)}{508} \times 100 = 35\%$$

(Eq.15)

- **Análise trecho – São Paulo (GRU) x Rio de Janeiro (GIG)**

A distância aeroviária entre os pontos em análise totaliza 339,93 km pelo modal aeroviário e 410,61 pelo modal rodoviário conforme os dados atualizados de 2023 disponíveis no pt.distance.to. Para facilitar a visualização da rota a mesma pode ser visualizada na figura 8. Os valores calculados podem ser encontrados na tabela 12.

Figura 8. Representação trajeto rodoviário (azul) x aeroviário (preto) – GRU x GIG.



Fonte: pt.distance.to, 2023.

Tabela 12. Cálculo das emissões totais e per capita – GRU x GIG.

Categoria	Combustível	Quantidade (Und.)	Percurso (Km)	Fator de Emissão Co2eqxKg/km	Emissão KgxC02eq	Quantidade máxima transportado	Emissão Per Capita.
Automóvel	Gasolina C.	1	410,61	0,224	91,98	5	18,40
	Etanol Hid.	1	410,61	0,059	24,23	5	4,85
	Flex-fuel	1	410,61	0,143	58,72	5	11,74
Motocicletas	Gasolina C.	1	410,61	0,054	22,17	2	11,09
	Flex-fuel	1	410,61	0,047	19,30	2	9,65
Ônibus	Diesel	1	410,61	0,236	96,90	50	1,94
Caminhão	Diesel	1	410,61	0,236	96,90	2	48,45
Aeroviário	QAV	1	339,93	0,255	86,68	186	0,47

Fonte: próprio autor, 2023.

Conforme cálculo realizado na calculadora de emissões co2legal esta rota emite cerca de 113 KgxC02eq, a partir disso foi possível obter a taxa de erro esperada do cálculo;

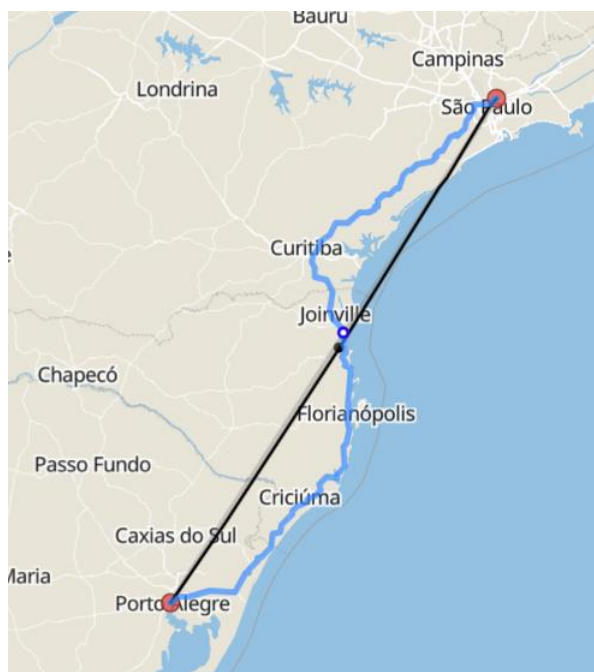
$$Taxa de Erro Emissão CO2 = \frac{(113 - 86,68)}{113} \times 100 = 30\%$$

(Eq.16)

- **Análise trecho – Porto Alegre (POA) x São Paulo (GRU)**

Por fim, temos que a distância entre os pontos em consideração totaliza 871,65 km no modal aeroviário, enquanto a rota de condução rodoviária abrange uma extensão de 1.160,62 km (pt.distance.to, 2023). As mesmas podem ser visualizadas na figura 9 e memorial de cálculo de emissões pelo método Bottom up na tabela 13.

Figura 9. Representação trajeto rodoviário (azul) x aeroviário (preto) – POA x GRU.



Fonte: pt.distance.to, 2023.

Tabela 13. Cálculo das emissões totais e per capita – POA x GRU.

Categoria	Combustível	Quantidade (Und.)	Percurso (Km)	Fator de Emissão Co2eqxKg/km	Emissão KgxC02eq	Quantidade máxima transportado	Emissão Per Capita.
Automóvel	Gasolina C.	1	1.160,62	0,224	259,98	5	52,00
	Etanol Hid.	1	1.160,62	0,059	68,48	5	13,70
	Flex-fuel	1	1.160,62	0,143	165,97	5	33,19
Motocicletas	Gasolina C.	1	1.160,62	0,054	62,67	2	31,34
	Flex-fuel	1	1.160,62	0,047	54,55	2	27,27
Ônibus	Diesel	1	1.160,62	0,236	273,91	50	5,48
Caminhão	Diesel	1	1.160,62	0,236	273,91	2	136,95
Aeroviário	QAV	1	871,65	0,255	222,27	186	1,20

Fonte: próprio autor, 2023.

Conforme cálculo realizado na calculadora de emissões co2legal esta rota emite cerca de 206 KgxC02eq, a partir disso foi possível obter a taxa de erro esperada do cálculo;

$$Taxa\ de\ Erro\ Emissão\ CO2 = \frac{(206 - 222,27)}{206} \times 100 = 7,89\%$$

(Eq.17)

Em conclusão, é inegável que todos os meios de transporte contribuem significativamente para as emissões de dióxido de carbono desempenhando um papel crucial nas mudanças climáticas. Entre eles, os caminhões destacam-se como grandes emissores.

Embora as aeronaves sejam reconhecidas como emissores significativos de CO₂, é importante notar que devido à eficiência das rotas em linha reta e à capacidade de transportar um grande número de passageiros, a quantidade relativa de emissões por unidade de indivíduo transportado é muito menor quando comparada a outros meios. Essa eficiência é crucial ao buscar soluções para mitigar o impacto ambiental do transporte.

4.4 IMPACTO NA SAÚDE

Para conduzir uma análise sobre o impacto na saúde por emissões de poluentes de dióxidos de carbono, é crucial compreender a relação direta e proporcional entre o aumento das emissões totais no país e a incidência de doenças respiratórias. Com base nesse entendimento, pode-se determinar como a quantidade total de emissões de CO₂ dos sistemas rodoviário e aeroviário afeta diretamente a situação.

Ao examinar o impacto na saúde das emissões de dióxidos de carbono, é essencial ir além das considerações tradicionais do transporte e abordar externalidades que transcendem diretamente as emissões. A relação entre o aumento total de emissões nacionais e doenças respiratórias revela-se crucial. Embora este estudo, por sua natureza como trabalho de conclusão de curso, simplifique a análise para focar nas emissões de CO₂ do transporte rodoviário e aéreo, reconhece a presença de fatores interligados. A abordagem direta visa a obtenção de uma análise inicial, reconhecendo que as externalidades podem estender além das emissões, impactando a saúde de maneiras complexas e multifacetadas. Este enfoque visa fornecer insights iniciais, respeitando a complexidade do tema e abrindo caminho para considerações mais abrangentes em futuras pesquisas.

Através dos graficos retirados do Global Burden of Diseases – IHME, na qual esta representado na tabela 14 foi possivel analisar a quantidade aproximada de pessoas com mortes por problemas respiratórios em cada ano no país até 2019.

Tabela 14. Quantidade de óbitos por causas respiratórias Brasil.

Ano	Doenças respiratórias	Neoplasia sistema respiratório	Total Óbitos
1990	40.253,50	15.661,24	55.914,74
1991	40.890,62	15.934,02	56.824,64
1992	42.710,30	16.526,25	59.236,55
1993	45.747,28	17.482,61	63.229,89
1994	47.314,70	18.015,71	65.330,41
1995	49.102,65	18.577,84	67.680,49
1996	51.461,29	19.332,68	70.793,97
1997	52.547,57	19.840,47	72.388,04
1998	54.781,32	20.712,57	75.493,89
1999	55.800,52	21.453,98	77.254,50
2000	56.021,12	22.189,70	78.210,82
2001	56.609,56	22.885,07	79.494,63
2002	57.465,99	23.539,72	81.005,71
2003	58.356,39	24.325,47	82.681,86
2004	58.969,55	25.067,97	84.037,52
2005	57.961,71	25.313,43	83.275,14
2006	58.312,71	25.976,78	84.289,49
2007	58.747,28	26.737,63	85.484,91
2008	59.337,82	27.526,93	86.864,75
2009	60.514,84	28.346,53	88.861,37
2010	61.948,21	29.271,84	91.220,05
2011	63.234,87	30.154,85	93.389,72
2012	63.703,52	30.815,06	94.518,58
2013	64.961,64	31.733,97	96.695,61
2014	65.973,83	32.518,09	98.491,92
2015	67.974,87	33.512,59	101.487,46
2016	70.593,61	34.800,81	105.394,42
2017	71.522,85	35.043,34	106.566,19
2018	73.857,60	35.825,83	109.683,43
2019	76.550,65	36.987,11	113.537,76

Fonte: Global Burden of Diseases – IHME, 2023.

A partir disso, foi preciso identificar a quantidade de emissões totais pelo setor de transporte para cada ano no Brasil. Foi realizado a análise das emissões obtidas do site do World Resources Institute representado na tabela 15, que oferece valores totais aproximados das emissões de CO2 no setor de transporte. Esses dados serão utilizados exclusivamente para fins de comparação metodológica, uma vez que seguem uma metodologia de verificação global alinhada com as informações obtidas do Global Burden of Disease.

Tabela 15. Emissões de CO2 setor de transporte e total (Desconsiderando desmatamento).

Ano	Emissão CO2 - Transporte - Mtco2eq	Emissão CO2 - Total - Mtco2eq
1990	82,18	201,06
1991	85,97	209,42
1992	86,61	211,89
1993	90,08	220,03
1994	94,21	228,14
1995	104,19	247,04
1996	113,67	269,02
1997	120,61	289,33
1998	126,9	298,84
1999	124,25	324,94
2000	125,48	331,57
2001	128,04	331,39
2002	130,01	324,2
2003	127,51	342,02
2004	136,45	346,06
2005	137,19	350,09
2006	140,26	368,17
2007	145,97	392,73
2008	151,34	366,82
2009	148,72	416,51
2010	167,99	438,39
2011	185,15	473,06
2012	202,54	504,68
2013	209,78	530,2
2014	215,22	505,9
2015	200,01	464,77
2016	199,05	473,08
2017	200,18	450,58
2018	191,87	452,28
2019	193,58	429,11

Fonte: World Resources Institute, 2023.

Com base nessas informações, é possível calcular as razões entre os dados obtidos buscando identificar um valor com a menor variação média possível, a fim de permitir o uso da proporção.

Tabela 16. Razão e erro absoluto entre emissões de CO2 e causas de óbitos no Brasil.

Ano	Razão: Emi. Transp./obt.	Erro Absoluto	Razão Emi. Total/obt.	Erro Absoluto	Razão: Emi. Transp./Neoplasia	Erro Absoluto	Proporção Emi. Transp./sind. Resp.	Erro Absoluto
1990	1469,74	241,81	3595,83	644,59	5247,35	416,03	2041,56	419,35
1991	1512,90	198,65	3685,37	555,05	5395,37	268,01	2102,44	358,47
1992	1462,10	249,44	3577,01	663,40	5240,75	422,63	2027,85	433,06
1993	1424,64	286,91	3479,84	760,58	5152,55	510,83	1969,08	491,83
1994	1442,05	269,49	3492,10	748,32	5229,32	434,06	1991,14	469,78
1995	1539,44	172,11	3650,09	590,33	5608,29	55,09	2121,88	339,03
1996	1605,65	105,90	3800,04	440,38	5879,68	216,30	2208,84	252,07
1997	1666,16	45,39	3996,93	243,49	6078,99	415,61	2295,25	165,66
1998	1680,93	30,62	3958,47	281,95	6126,71	463,33	2316,48	144,43
1999	1608,32	103,23	4206,10	34,32	5791,47	128,08	2226,68	234,23
2000	1604,38	107,17	4239,44	0,98	5654,88	8,51	2239,87	221,04
2001	1610,67	100,87	4168,71	71,71	5594,91	68,47	2261,81	199,10
2002	1604,95	106,60	4002,19	238,23	5523,01	140,38	2262,38	198,53
2003	1542,18	169,37	4136,58	103,84	5241,83	421,55	2185,02	275,89
2004	1623,68	87,87	4117,92	122,50	5443,20	220,18	2313,91	147,01
2005	1647,43	64,12	4204,02	36,40	5419,65	243,73	2366,91	94,00
2006	1664,03	47,52	4367,92	127,50	5399,44	263,95	2405,31	55,60
2007	1707,55	4,00	4594,14	353,73	5459,35	204,04	2484,71	23,80
2008	1742,25	30,70	4222,89	17,53	5497,89	165,49	2550,48	89,57
2009	1673,62	37,93	4687,19	446,77	5246,50	416,89	2457,58	3,33
2010	1841,59	130,04	4805,85	565,43	5738,96	75,58	2711,78	250,87
2011	1982,55	271,00	5065,44	825,02	6139,97	476,59	2927,97	467,06
2012	2142,86	431,31	5339,48	1099,06	6572,76	909,38	3179,42	718,50
2013	2169,49	457,94	5483,19	1242,77	6610,58	947,20	3229,29	768,38
2014	2185,15	473,60	5136,46	896,04	6618,47	955,09	3262,20	801,29
2015	1970,79	259,24	4579,58	339,16	5968,20	304,82	2942,41	481,50
2016	1888,62	177,07	4488,66	248,24	5719,69	56,31	2819,66	358,75
2017	1878,46	166,91	4228,17	12,25	5712,36	48,97	2798,83	337,91
2018	1749,31	37,76	4123,50	116,92	5355,63	307,75	2597,84	136,92
2019	1704,98	6,57	3779,45	460,97	5233,72	429,67	2528,78	67,87
Média	1711,55	162,37	4240,42	409,58	5663,38	333,15	2460,91	300,16
Variação Média		-9,5%		-9,7%		-5,9%		-12,2%

Fonte: Próprio autor com dados do (WRI) e (IHME), 2023.

Com base na análise realizada neste estudo, concluímos que considerando uma relação direta e única entre as emissões de CO2 e óbitos, a cada emissão de 1711,55 Kg de CO2 equivalente, uma pessoa falece no Brasil devido a problemas respiratórios. Além disso, a cada 5663,38 kg de CO2 equivalente, uma pessoa falece devido a neoplasias relacionadas às emissões de CO2 como fator agravante.

Outro dado relevante para a construção do modelo é o custo médio anual do tratamento de neoplasias respiratórias, conforme informado no estudo de Renata Erthal Knust, publicado

na Revista de Saúde Pública em 2017. Esse custo aproximado é de R\$ 25.439,07 por pessoa ao longo de 12 meses.

Ao levar em conta apenas os óbitos registrados em 2017 e considerando um período de tratamento de 12 meses para cada indivíduo, o custo anual para o tratamento desse grupo específico é aproximadamente R\$ 891.469.979,29 no Brasil, como demonstrado na equação 18 e 19, considerando os dados informados acima.

$$\text{Custo Saúde óbitos} = \text{Custo individual} \times \text{quantidade de óbitos por neoplasia} \quad (\text{Eq. 18})$$

$$\text{Custo Saúde óbitos} = 25.439,07 \times 35.043,34 = \text{R\$ } 891.469.979,29 \quad (\text{Eq. 19})$$

5. PROPOSTAS DE MITIGAÇÃO

A análise comparativa das emissões entre os sistemas rodoviário e aeroviário revela que as principais fontes de emissão no país per capita estão associadas ao sistema rodoviário, especialmente no que diz respeito a automóveis particulares e motocicletas. Embora tenha sido observada uma elevada emissão proveniente de caminhões é importante destacar que grande parte dessas emissões está relacionada ao transporte de cargas. Dado que esse estudo não aborda esse aspecto específico, de fato, ele se mostra incompleto para uma abordagem abrangente e eficaz de mitigação das emissões para a categoria de caminhões.

A partir disso, e na busca por soluções sustentáveis no transporte para redução de emissões de CO_2 , pode-se iniciar citando um caso de sucesso como na cidade de Bogotá na Colômbia. O sistema de transporte implementado na cidade pode ser destacado pela ênfase no transporte coletivo público. A utilização de corredores expressos e a adoção de linhas centrais de grande capacidade, especialmente operadas por ônibus articulados transformaram a mobilidade urbana e também a quantidade de emissões de poluentes da cidade.

De fato, a partir do ponto que restringimos a presença de veículos privados nas ruas podemos organizar o sistema de transporte a fim de melhorar sua produtividade e eficiência, outro ponto, que assim como implantado em Bogotá, deve-se adotar medidas para desencorajar o uso excessivo de automóveis particulares, como a sobretaxa sobre a gasolina. Vale ressaltar, que deve ser avaliado cuidadosamente esse último aspecto que é crucial devido às externalidades que podem ser desencadeadas no mercado econômico brasileiro pela redução do consumo de combustíveis fósseis no país.

Outros pontos mitigatórios que de fato poderiam reduzir as emissões de CO_2 no sistema rodoviário brasileiro é a inspeção veicular que emerge como uma medida crucial para o controle das emissões de poluentes. Reconhecendo que veículos mais antigos sem manutenção adequada são fontes significativas de poluição atmosférica a implementação de programas de inspeção veicular obrigatória pelo governo federal é imprescindível. De fato, a manutenção adequada não apenas reduz as emissões nocivas, mas também contribui para a eficiência do combustível, promovendo assim práticas mais sustentáveis no setor de transporte.

Ademais, pode-se seguir pelo caminho sobre o constante avanço tecnológico, na qual vem desempenhando um papel crucial na criação de soluções mais sustentáveis. A pesquisa e implementação de tecnologias como uso de etanol e hidrogênio verde que emite menos e

combustíveis renováveis, como a eletricidade, entre outras inovações são fundamentais para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais.

Em última análise, como medida principal de mitigação para o sistema rodoviário observada neste estudo se destaca o estímulo à expansão da malha aeroviária no país, juntamente com a redução dos custos das passagens aéreas e dos combustíveis utilizados. Este estudo evidencia de maneira notável que ao analisar a poluição per capita o transporte aeroviário exhibe os valores mais baixos entre as opções consideradas, emergindo como uma alternativa altamente válida. Do estudo realizado, conclui-se que cada passageiro que escolhe o deslocamento aeroviário, em comparação ao transporte rodoviário, emite 96,59% menos carbono.

Além disso, no âmbito da aviação é possível adotar medidas mitigatórias, como a manutenção regular das aeronaves que desempenha um papel crucial na segurança e sustentabilidade. A implementação de práticas adequadas de manutenção incluindo o controle de peso da aeronave e a limpeza contínua, contribui para a eficiência operacional e a minimização do impacto ambiental.

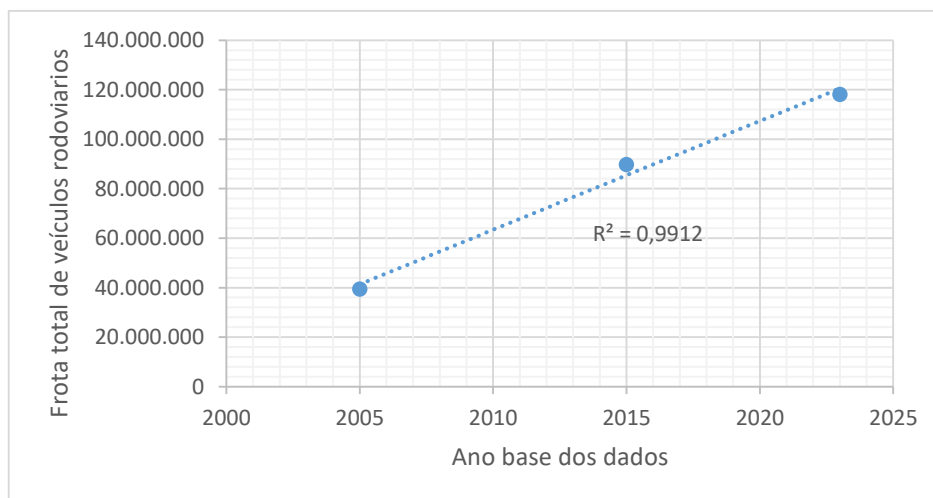
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção do estudo será desempenhado um papel central na edificação da argumentação e na contribuição para o conhecimento científico sobre o tema analisado, oferecendo insights. Isso será alcançado por meio da apresentação de gráficos derivados das informações obtidas no estudo, estabelecendo além de conexão com as informações apresentadas nas propostas de mitigação.

Inicialmente, é possível examinar a distribuição e crescimento da frota rodoviária brasileira nos anos de 2005, 2015 e 2023, categorizando de acordo com as classificações do Ministério dos Transportes.

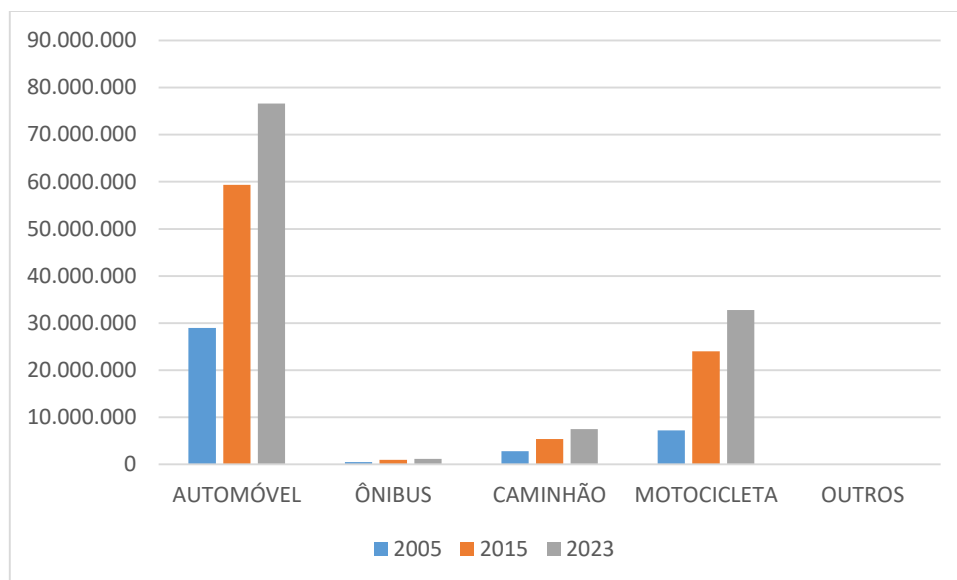
Com isso, através dos dados consolidados obtidos é possível através de uma condensação de informações gerar um gráfico de dispersão, na qual pode ser traçando uma linha de tendência, e, conseqüentemente descobrir um padrão de crescimento, que pode ser projetada para anos futuros. Partindo desse pressuposto foi criado a figura 10.

Figura 10. Gráfico de reta de crescimento da frota de veículos rodoviários no Brasil.



Fonte. Adaptado através dos dados do ministério dos transportes, 2023.

Figura 11. Frota de veículos por categoria no Brasil.



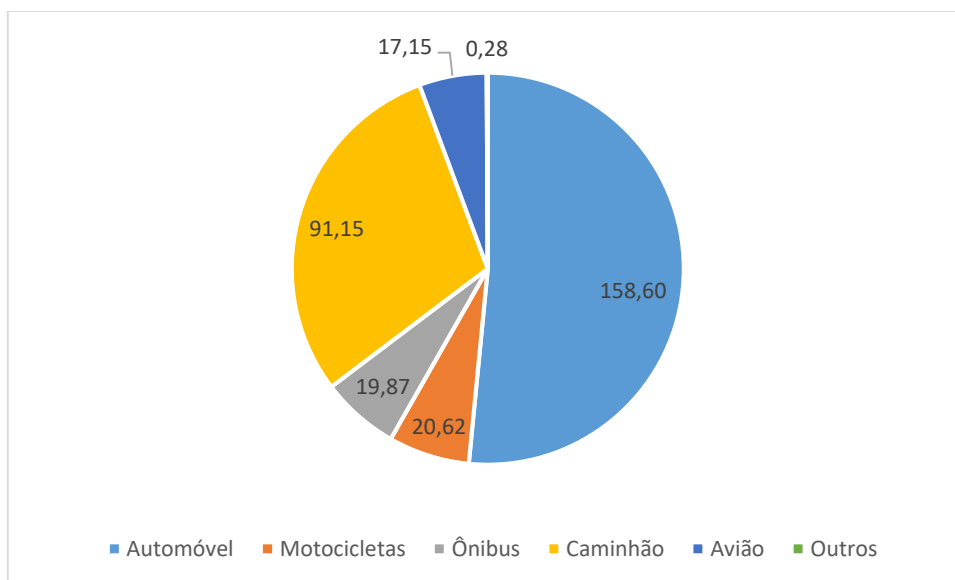
Fonte: Feito pelo próprio autor com dados do *Ministério do Transporte*, 2023.

Ao analisar a figura 11, torna-se evidente o considerável aumento no número de veículos no país, principalmente de automóveis e motocicletas particulares. Isso reflete uma realidade altamente desafiadora em termos de mitigação das emissões de CO₂, pois vem em sentido contrário as propostas de redução.

Uma estratégia viável para sustentar o crescimento da frota de veículos no país sem acarretar significativas externalidades e desafios operacionais para as indústrias automotivas, seria promover o desenvolvimento da indústria de veículos elétricos. Isso pode ser alcançado por meio do incentivo à conscientização da população, taxaço de combustíveis fosseis, da disponibilizaço de financiamentos com taxas reduzidas para empresas e industrias com propostas vinculadas, ademais para os indivíduos interessados em adquirir veículos elétricos próprios.

Um aspecto adicional a ser destacado nesta análise é à quantidade de emissões por tipo de transporte no sistema rodoviário e aeroviário, conforme ilustrado na figura 12.

Figura 12. Emissões de CO₂ em MtxCO₂eq por tipo de modal de transporte.



Fonte: Feito pelo próprio autor, 2023.

Adicionalmente a esta análise é possível examinar os valores médios a partir do estudo de emissões per capita de cada transporte em 1.000 km percorridos como apresentado na tabela 17, vale ressaltar que para o sistema aeroviário foi considerado a mesma aeronave padrão do estudo de caso.

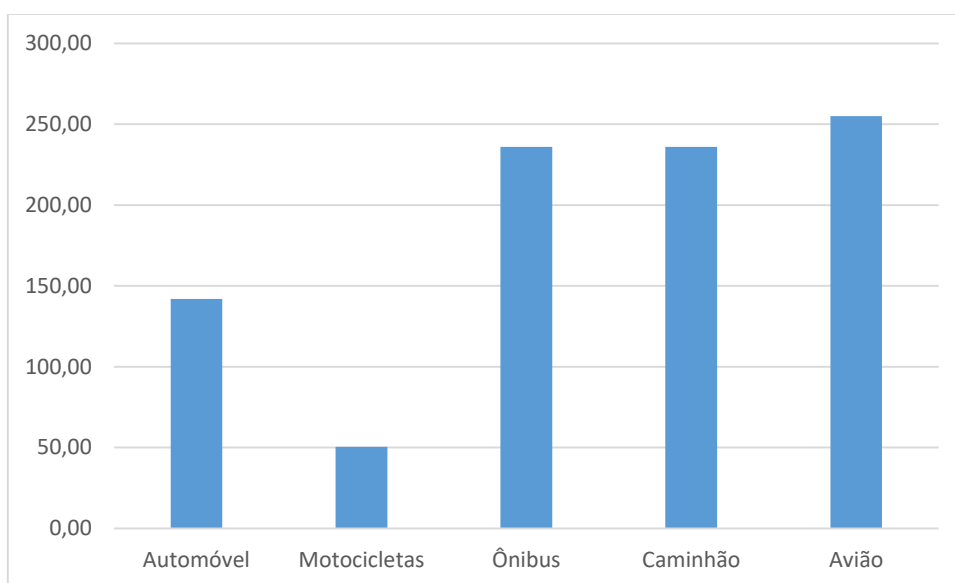
Tabela 17. Emissões de CO₂ per capita para cada transporte a cada 1000 km.

Categoria	Combustível	Quantidade (Und.)	Percurso (Km)	Fator de Emissão Co ₂ eqxKg/km	Emissão KgxC ₂ eq	Quantidade transportada por veículo.	Emissão Per Capita.
Automóvel	Gasolina C.	1	1.000,00	0,224	224,00	5	44,80
	Etanol Hid.	1	1.000,00	0,059	59,00	5	11,80
	Flex-fuel	1	1.000,00	0,143	143,00	5	28,60
Motocicletas	Gasolina C.	1	1.000,00	0,054	54,00	2	27,00
	Flex-fuel	1	1.000,00	0,047	47,00	2	23,50
Ônibus	Diesel	1	1.000,00	0,236	236,00	50	4,72
Caminhão	Diesel	1	1.000,00	0,236	236,00	2	118,00
Aeroviário	QAV	1	1.000,00	0,255	255,00	186	1,37

Fonte: Feito pelo próprio autor, 2023.

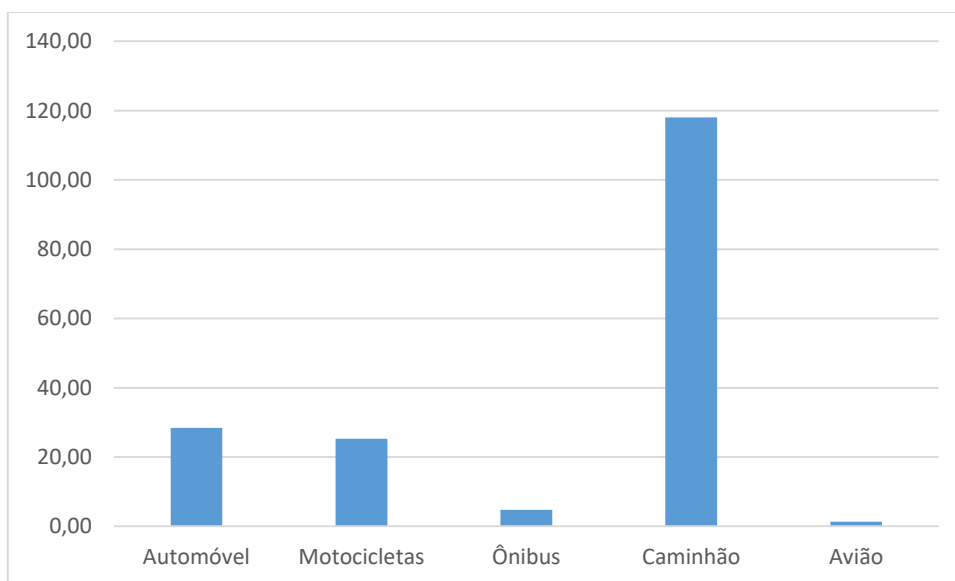
Para facilitar a proporção de emissões foi construído a figura 13 e 14;

Figura 13. Emissão média Kg_xCO₂eq cada 1000km.



Fonte: Feito pelo próprio autor, 2023.

Figura 14. Emissões de Kg_xCO₂eq per capita média para cada transporte a cada 1000 km.



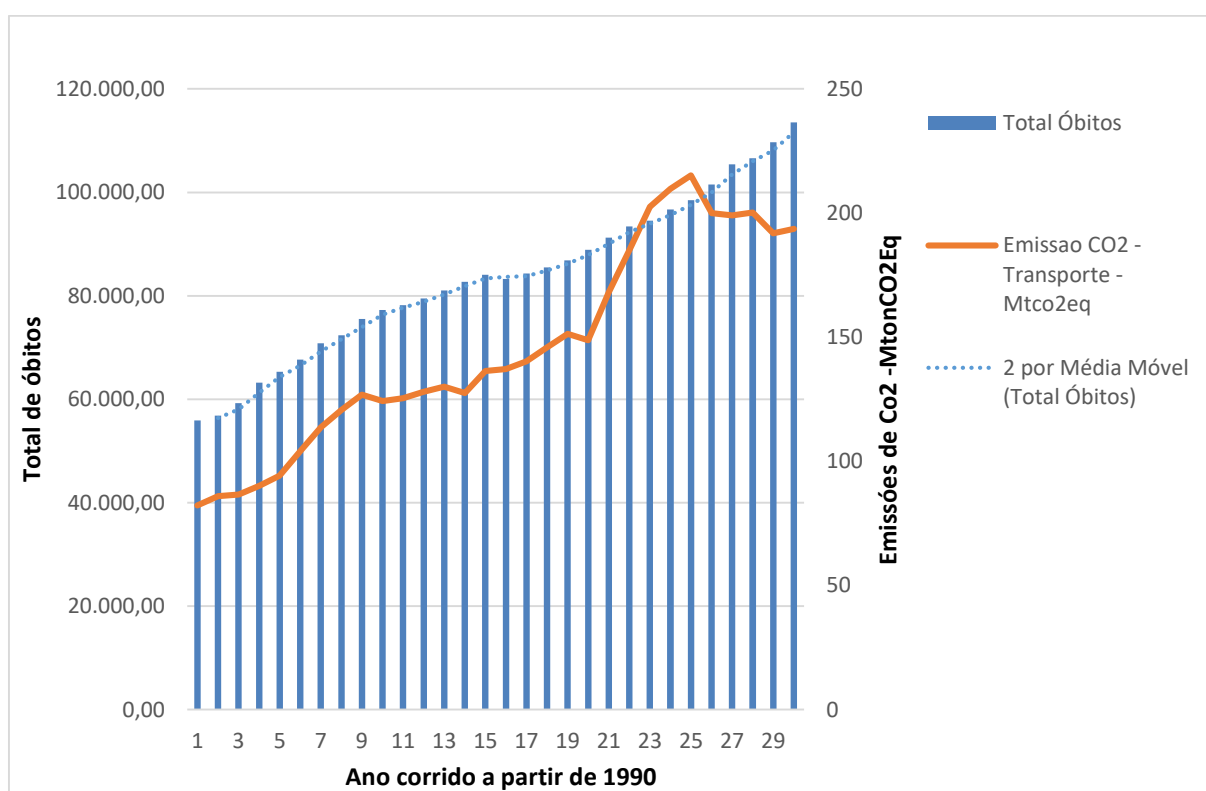
Fonte: Feito pelo próprio autor, 2023.

É perceptivo a alta emissão de caminhões no sistema analisado, mas é de fato um déficit do estudo pois existe a dificuldade da análise nesse aspecto específico por conta de apresentar finalidade de transporte de cargas e não de pessoas. De fato, como observado através da figura 28 a medida principal de mitigação para o sistema rodoviário, é o estímulo à expansão da malha aeroviária, incentivando a redução de custos gerais na cadeia de suprimentos. O transporte aeroviário exibe as menores emissões per capita, sugerindo ser uma alternativa altamente

válida, com uma redução de 96,59% nas emissões de CO₂ por passageiro em comparação ao transporte rodoviário.

Este estudo ainda destacou de forma crítica como as emissões de CO₂ estão contribuindo para o aumento de óbitos relacionados a problemas respiratórios em todo o país conforme ilustrado na figura 15, com dados abrangendo o período de 1990 a 2019.

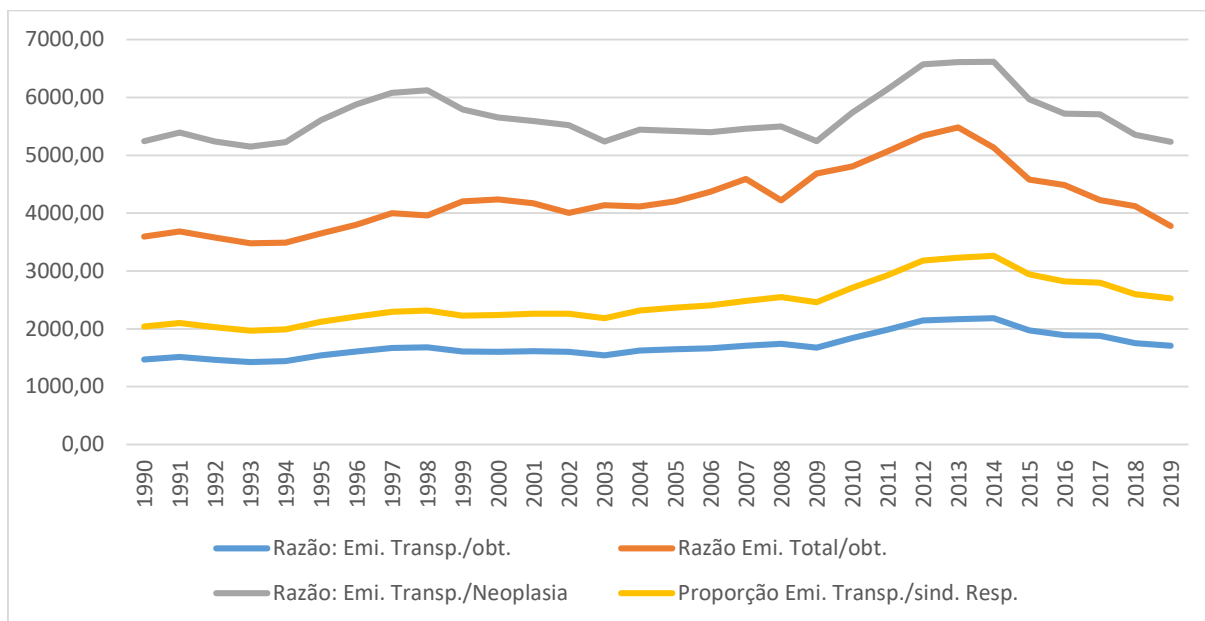
Figura 15. Evolução das emissões de CO₂ em relação a quantidade de óbitos por problemas respiratórios.



Fonte: Feito pelo próprio autor com dados do World Resources Institute e Global Burden of Diseases, 2023.

De fato, estabelecendo uma correlação direta entre as emissões de CO₂ no Brasil e óbitos por problemas respiratórios e neoplasias. Como demonstrado no desenvolvimento do modelo a cada 1711,55 Kg de CO₂ equivalente, uma pessoa vem a óbito devido a problemas respiratórios, enquanto a cada 5663,38 Kg, uma pessoa falece por neoplasias relacionadas às emissões de CO₂ como apresentado na figura 16.

Figura 16. Comparação entre proporção de mortes por problemas respiratórios e emissões de CO2 no Brasil.

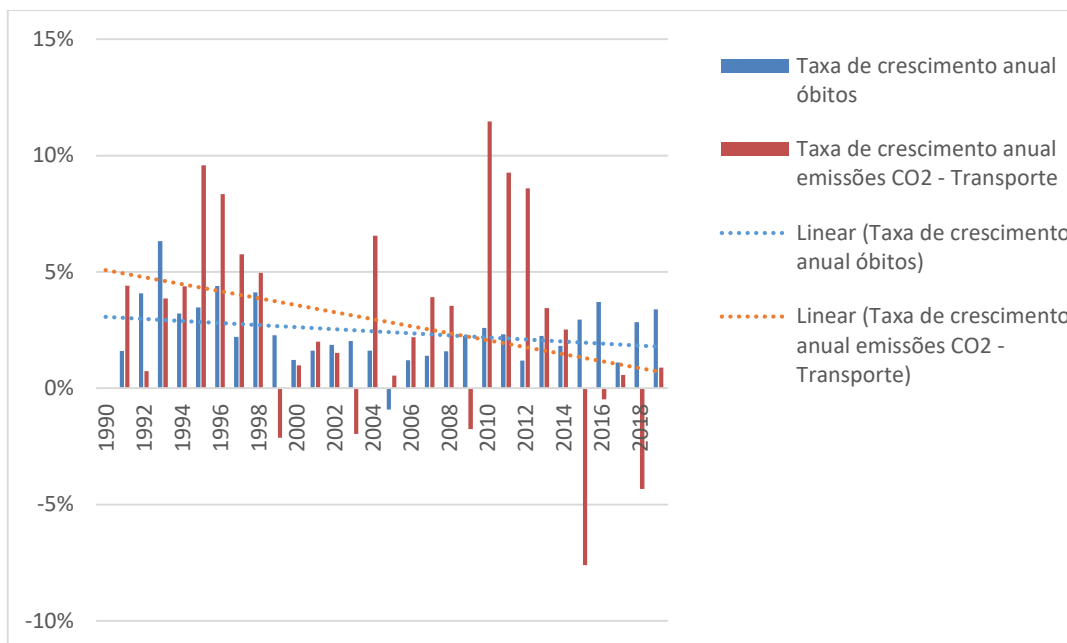


Fonte: Feito pelo próprio autor com dados do World Resources Institute e Global Burden of Diseases, 2023.

É evidente que todas as razões exibiram variações médias maiores que 5% e menores do que 15%. Como introdução a este estudo, optaremos por utilizar a razão de emissão de CO2 pelo setor de transporte em relação ao número total de óbitos que apresentou 9,5% de variação e como em relação às neoplasias que apresentou 5,9% de variação média.

Adicionalmente, também foi calculada a taxa de crescimento anual das emissões de CO2 e dos óbitos no país. Uma observação positiva é que as taxas de crescimento anual de ambos os conjuntos de dados estão em declínio indicando que as medidas adotadas pelos agentes governamentais estão surtindo impacto. No entanto, é relevante notar que as taxas de crescimento ainda não atingiram valores negativos constantes como apresentado na figura 17, que seria o ideal para uma análise mais otimista.

Figura 17. Taxa de crescimento anual de óbitos por problemas respiratórios e emissões de CO2 no Brasil.



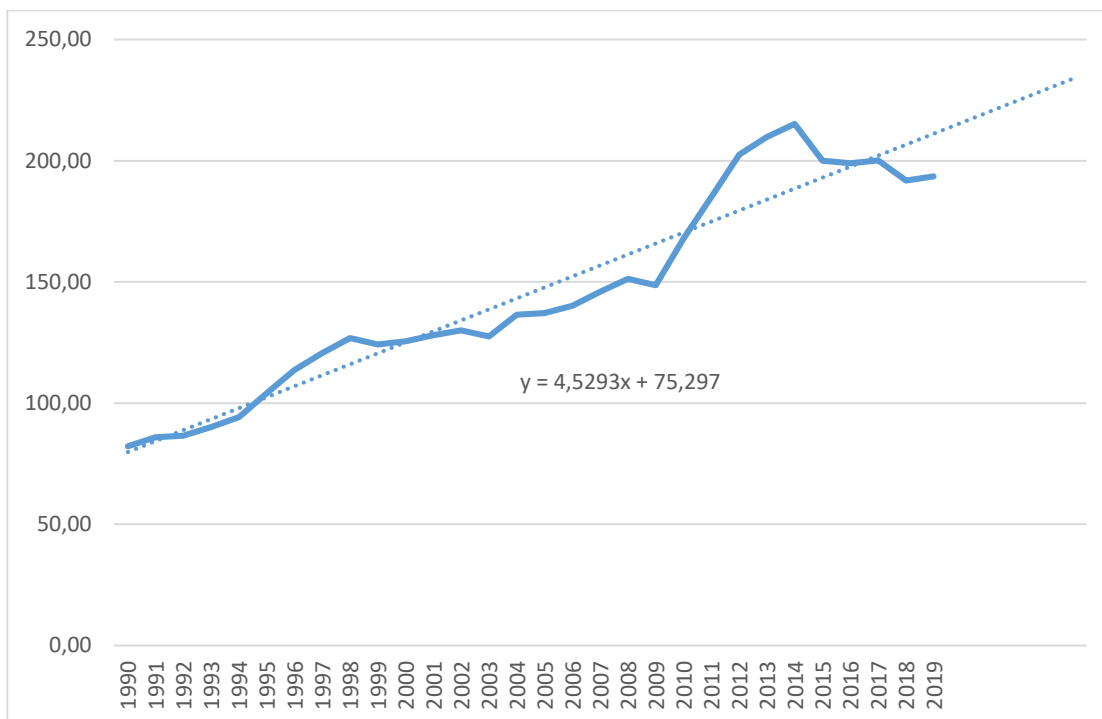
Fonte: Feito pelo próprio autor com dados do World Resources Institute e Global Burden of Diseases, 2023.

Evidenciando o fato que apesar de todas as medidas mitigatórias adotadas as taxas de crescimento permanecem positivas. Isso principalmente ocorre pois não existe perspectiva de um declínio contínuo nas vendas de automóveis particulares com motores de combustão interna no país, ou a expansão constante e efetiva de uso de outros modais como avião e ônibus para fins de deslocamento.

Finalmente, buscando validar os valores de emissão de CO2 analisados nesta pesquisa, pretende identificar as discrepâncias entre esses dados e as informações divulgadas anualmente por sites de análises. Nesse estudo foi obtido o valor de aproximadamente 290,53 milhões de tonelada de CO2 equivalente pelo setor rodoviário e cerca de 17,15 milhões de tonelada de CO2 equivalente pelo setor aeroviário. Ambos os dados totalizam 307,68 milhões de tonelada de CO2 equivalente.

Para base de análise iremos utilizar os dados do World Resources Institute para obter a taxa de crescimento e a previsão de emissão para o ano de 2023, como apresentado na figura 18, pode ser aproximado uma emissão estimada de 240 milhões de tonelada de CO2 equivalente para o setor de transporte no Brasil pelo World Resources Institute.

Figura 18. Emissão CO₂ - Transporte - Mtco2eq.



Fonte: World Resources Institute, 2023.

A partir disso chega a seguinte taxa de erro;

$$Erro \% = \frac{Valor\ Teórico - Valor\ experimental}{Valor\ Teórico} \times 100 \quad (Eq.20)$$

$$Erro \% = \frac{240 - 307,68}{240} \times 100 = 28\% \quad (Eq.21)$$

Dessa forma, por meio desta pesquisa que se baseou em dados de emissões e consumo de combustível, assim como do desempenho médio anuais dos modais no país, chega a um valor de emissões 28% superior ao que está sendo divulgado. Isso ocorre devido à ausência de uma equação ou método amplamente utilizado no cálculo, bem como ao emprego de análises discrepantes dos sistemas *top-down* e *bottom-up*. A taxa de erro de 28% se revela coerente, uma vez que permanece dentro do mesmo campo de unidade de medida divulgada.

7. CONCLUSÕES

A distribuição e crescimento da frota rodoviária no Brasil, evidenciando o aumento de veículos particulares, desafiam estratégias de mitigação. A análise das emissões de CO₂ destaca a relevância de caminhões e carros privados no Brasil. A expansão da malha aérea, com baixas emissões per capita, emerge como uma das principais medidas para mitigar as emissões do transporte rodoviário, promovendo uma redução significativa. Ao correlacionar emissões de CO₂ com óbitos por problemas respiratórios e neoplasias, revela-se uma relação direta, sublinhando implicações para a saúde. Embora as taxas de crescimento anual para óbitos e emissões mostrem declínio, sinalizando impactos positivos das medidas governamentais, destaca-se a necessidade de taxas negativas constantes para uma perspectiva otimista. A validação dos resultados com dados do World Resources Institute revela uma taxa de erro de 28% considerada compreensível para análise de emissões de CO₂, atribuída à falta de consenso e análises discrepantes entre abordagens top-down e bottom-up. Em síntese, a pesquisa desempenha seu papel ao oferecer insights críticos sobre as emissões no transporte brasileiro, propondo medidas específicas de mitigação e sublinhando a necessidade contínua de atenção para atingir metas ambientais e de saúde pública.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. EMISSÕES RELATIVAS DE POLUENTES DO TRANSPORTE URBANO. Boletim regional, urbano e ambiental, [S. l.], p. 123-139, 5 jun. 2011. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/5574/1/BRU_n05_emiss%c3%b5es.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

BETIOLO, Camila Renzetti; ROCHA, Guilherme Conceição; MACHADO, Paulo Roberto de Carvalho. INICIATIVAS DA AVIAÇÃO PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES DE CO₂. VIII SITRAER, [S. l.], p. 9, 28 dez. 2019. Disponível em: http://www.dcabr.org.br/download/publicacoes-tecnicas/Iniciativas_da_Aviacao_para_Reducao_das_Emissoes_de_CO2.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

SIMÕES, André Felipe; SCHAEFFER, Roberto. Emissões de CO₂ devido ao transporte aéreo no Brasil. Revista Brasileira de Energia. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/161/144>. Acesso em: 30 nov. 2023.

LIMA, Gregório Costa Luz de Souza; PORTUGAL, Licínio da Silva. PERSPECTIVAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA ELETRIFICAÇÃO DOS TRANSPORTES. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET, [S. l.], p. 12, 13 nov. 2018. Disponível em: <https://repositorio.fgv.br/server/api/core/bitstreams/5ac5816d-3a77-403a-a25b-f158f8afcc7f/content>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. CETESB. EMISSÕES VEICULARES NO ESTADO DE SÃO PAULO 2016. GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO, SÃO PAULO, p. 221, 30 set. 2017. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2017/11/EMISS%C3%95ES-VEICULARES_09_nov.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

GBD Results. [S. l.], 31 dez. 2020. Disponível em: <https://vizhub.healthdata.org/gbd-results/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GRÁFICOS para entender as emissões de gases de efeito estufa por país e por setor. [S. l.], 28 fev. 2020. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/4-graficos-para-entender-emissoes-de-gases-de-efeito-estufa-por-pais-e-por-setor>. Acesso em: 30 nov. 2023.

FROTA de Veículos - 2023. [S. l.], 1 out. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>. Acesso em: 30 nov. 2023.

FROTA de Aeronaves Civis Brasileira em Tempo Real. [S. l.], 30 nov. 2023. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiaMGQ2MjdiMWYtNzQxZS00Mzk2LWE0NmEtMzFiMTNmNzI1OTk>

3liwidCI6ImI1NzQ4ZjZiLWI0YTQtNGIyYi1hYjJhLWVmOTUyMjM2ODM2NiIsImMiOjR9. Acesso em: 30 nov. 2023.

UEDA, Ana Cláudia; TOMAZ, Edson. INVENTÁRIO DE EMISSÃO DE FONTES VEICULARES DA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS, SÃO PAULO. International Year of Chemistry 2011, [S. l.], p. 5, 17 jun. 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/p9ZsdVvSZmTDfWBnyvHKdkD/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.

PERES, Luiz Artur Pecorelli; COSTA, Luiz Cláudio Ribeiro Rodrigues Sebastião Fabio Q. de A. Rocha Washington. NÍVEIS QUANTITATIVOS DE EFICIÊNCIA E EMISSÕES DE SISTEMAS DE PROPULSÃO VEICULAR. Eficiência Energética, [S. l.], p. 7, 31 ago. 2011. Disponível em: http://www.gruve.eng.uerj.br/download/87200_1p.pdf. Acesso em: 30 nov. 2023.

RELATÓRIOS e Publicações – Emissão Veicular. [S. l.], 30 nov. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CALCULADORA de CO₂. [S. l.], 30 nov. 2023. Disponível em: <https://idesam.org/calculadora/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

GONÇALVES, IRC; RAJAGOPAL, K; SEBRAO, SMZ. PROPRIEDADES VOLUMÉTRICAS DO QUEROSENE DE AVIAÇÃO COM ADIÇÃO DE BIOQUEROSENE. COBEQ 2018, [S. l.], p. 4, 26 set. 2018. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/12df/b60dff66f689107db7f0551543de4a6ef8e7.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.

CALCULADOR de distâncias. [S. l.], 30 nov. 2023. Disponível em: <https://pt.distance.to/>. Acesso em: 30 nov. 2023.

KNUST, Renata Erthal. Estimativa dos custos da assistência do câncer de pulmão avançado em hospital público de referência. REVISTA DE SAÚDE PÚBLICA, [S. l.], p. 11, 29 dez. 2017. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rsp/a/wNqz6vZwJWtTKtKtCk4gRxN/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 30 nov. 2023.