



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E  
GESTÃO TERRITORIAL

Guilherme Perosa Romanini

MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE: ANÁLISE DA APLICABILIDADE DOS  
CRITÉRIOS AO CENÁRIO BRASILEIRO

FLORIANÓPOLIS-SC

2024

Guilherme Perosa Romanini

MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE: ANÁLISE DA APLICABILIDADE DOS  
CRITÉRIOS AO CENÁRIO BRASILEIRO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial

Orientador: Prof. Dr. Jorge Destri Júnior.

FLORIANÓPOLIS-SC

2024

ROMANINI, GUILHERME PEROSA  
MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE: ANÁLISE DA  
APLICABILIDADE DOS CRITÉRIOS AO CENÁRIO BRASILEIRO /  
GUILHERME PEROSA ROMANINI ; orientador, JORGE DESTRI  
JÚNIOR, 2024.  
116 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,  
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.  
ROTEIRIZAÇÃO VERDE. 3. ROTEIRIZAÇÃO DE CARGAS. 4. SISTEMAS  
DE TRANSPORTE. 5. EMISSÃO DE POLUENTES. I. DESTRI JÚNIOR,  
JORGE. II. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e  
Gestão Territorial. III. Título.

Guilherme Perosa Romanini

**MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE: ANÁLISE DA APLICABILIDADE DOS  
CRITÉRIOS AO CENÁRIO BRASILEIRO**

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em XX de março de 2024,  
pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Jorge Destri Júnior, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. João Carlos Souza, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. João Eugênio Cavallazzi, Dr.  
Membro Externo

Prof. Eduardo Lobo, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado  
adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão  
Territorial.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Jorge Destri Júnior, Dr.  
Orientador

FLORIANÓPOLIS-SC, 2024.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Jorge Destri Junior agradeço pelo apoio ao longo de todo o período da construção dessa dissertação, aos meus pais Clair Romanini e Sinara Perosa pelo suporte familiar e incentivo incansável para que concluísse o trabalho e, também, a minha companheira Maíra pelo amor e companhia ao longo dos anos.

Gostaria de agradecer também a Universidade Federal de Santa Catarina e ao Departamento de Engenharia Civil pela formação e oportunidade de especialização de forma gratuita e de qualidade.

## RESUMO

A roteirização verde é uma abordagem para o planejamento de rotas que visa reduzir o impacto ambiental das operações de transporte, priorizando trajetos mais eficientes em termos de consumo de combustível e emissões de poluentes. Os métodos de roteirização verde permitem a otimização de rotas de transporte visando não apenas a redução dos custos, mas também a mitigação dos impactos ambientais através da utilização de critérios adicionais em relação a roteirização tradicional. Considerando a relevância do setor de transportes no volume de emissões globais de gases do efeito estufa, a otimização de rotas pode ser um dos principais mecanismos de redução de emissões no setor. Ao estudar os métodos de roteirização verde existentes disponíveis na bibliografia internacional, é possível notar que a ampla maioria dos métodos propostos foram desenvolvidos em contextos diferentes ao brasileiro, de forma majoritária em países do hemisfério norte. Esse fato direciona a pergunta dessa pesquisa: os métodos de roteirização verde são aplicáveis à realidade brasileira? Para chegar à resposta, foi realizado um estudo da bibliografia internacional a respeito do tema, de forma narrativa no capítulo de revisão bibliográfica, onde são avaliados dados do setor de transportes, sua relação com o meio ambiente e os métodos de roteirização de cargas tradicionais e com foco em sustentabilidade. Em seguida, foi construída uma revisão sistemática para obtenção das principais referências bibliográficas disponíveis a respeito do tema, através da qual foram encontrados 3160 artigos em 4 diferentes plataformas. Com isso, foi criada uma base de conhecimento sólida a respeito do tema, que permitiu o mapeamento dos principais critérios utilizados pelos pesquisadores nos métodos de roteirização verde existentes. Por fim, os esses critérios foram agrupados em categorias criadas a partir de suas semelhanças e foram avaliados em relação as características brasileiras de infraestrutura, legislação e frota. Essa análise permitiu a elaboração de diretrizes para construção de um método de roteirização verde otimizado ao Brasil, que leva em consideração as melhores práticas internacionais e as características locais brasileiras.

**Palavras-chave:** Roteirização Verde, Sistemas de Transportes, Emissão de Poluentes.

## ABSTRACT

Green routing is an approach to route planning aimed at reducing the environmental impact of transportation operations by prioritizing routes that are more fuel-efficient and have lower pollutant emissions. Green routing methods enable the optimization of transportation routes, aiming not only to reduce costs but also to mitigate environmental impacts by using additional criteria compared to traditional routing. Considering the relevance of the transportation sector in the volume of global greenhouse gas emissions, route optimization can be one of the main mechanisms for emission reduction in the sector. By studying existing green routing methods available in the international literature, it is possible to notice that most proposed methods were developed in contexts different from the Brazilian one, mostly in countries in the northern hemisphere. This fact directs the question of this research: are green routing methods applicable to the Brazilian reality? To answer this question, a study of the international literature on the subject was conducted, narratively in the literature review chapter, where data on the transportation sector, its relationship with the environment, and traditional cargo routing methods with a focus on sustainability are evaluated. Next, a systematic review was conducted to obtain the main bibliographic references available on the subject, through which 3160 articles were found on 4 different platforms. Thus, a solid knowledge base on the subject was created, which allowed the mapping of the main criteria used by researchers in existing green routing methods. Finally, these criteria were grouped into categories created from their similarities and were evaluated in relation to Brazilian infrastructure, legislation, and fleet characteristics. This analysis allowed the elaboration of guidelines for the construction of a green routing method optimized for Brazil, which considers the best international practices and Brazilian local characteristics.

**Keywords:** Green Routing Problem, Transportation Systems, Pollutant Emission.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Emissões de CO2 por setor da economia.....	18
Figura 2 – Geração de energia mundial 1990-2019 .....	18
Figura 3 – Emissão de CO2 por meios de transporte em 2018 .....	19
Figura 4 – Estudos no contexto da Roteirização Verde, 2021.....	21
Figura 5 – Fluxograma do processo de construção do trabalho .....	25
Figura 6 – Smog observada em Pequim, China (2013).....	28
Figura 7 – Participação dos setores da economia no PIB dos Estados Unidos entre 1839 e 2016. ....	29
Figura 8 – Crescimento nas trocas globais entre 1800 e 2014. ....	30
Figura 9- Crescimento da demanda por frete e PIB. ....	31
Figura 10 – Comparação de eficiência entre Rodovia, Ferrovia e Cabotagem em função da distância .....	32
Figura 11 – Matriz de transporte em países continentais .....	33
Figura 12 – Emissões de gases de efeito estufa por país, 1990 a 2019. ....	36
Figura 13 – Emissões de gases do efeito estufa per capita por país, 1990 à 2019. ...	37
Figura 14 – Emissões de gases de efeito estufa sob a perspectiva histórica, 1790 a 2020. ....	38
Figura 15 – Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020 (GtCO2e)39	
Figura 16 – Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia de 1970 a 2020. ....	40
Figura 17 – Emissões de CO2 equivalente por modo de transporte no mundo em 2018 .....	41
Figura 18 – Emissões de gases de efeito estufa por modal de transporte entre 1990 e 2008 no Estado de São Paulo .....	41
Figura 19 – Emissões de CO2 equivalente no transporte no Brasil, 2006. ....	42
Figura 20 – Comparação da emissão de CO2 por modos de transporte.....	42
Figura 21- Redução do custo da bateria de Íon-Lítio entre 1991 e 2018 .....	44
Figura 22 – Evolução do volume de créditos de carbono gerados no Brasil e no Mundo entre 2005 e 2021 .....	49
Figura 23 – Representação de um roteiro do PCV .....	50
Figura 24 – Número de artigos publicados sobre PRV entre 1954 e 2006 .....	52
Figura 25 – Soluções para o PRV.....	53



Figura 26 – Método do caminho mais curto.....	54
Figura 27 – Método do ponto mais distante .....	55
Figura 28 – Método Clarke e Wright.....	55
Figura 29 – Método de melhoria de roteiro .....	56
Figura 30 – Método da Varredura. ....	58
Figura 31 – Divisão da roteirização verde em função das características dos problemas .....	60
Figura 32 – Divisão da roteirização verde em função dos métodos de resolução....	61
Figura 33 – Estudos no contexto da Roteirização Verde, 2021.....	62
Figura 34 – Distribuição de artigos por ano .....	62
Figura 35 – Classificação da roteirização verde .....	63
Figura 36 – Ilustração do problema proposto por Zhao e Lu .....	65
Figura 37 – Etapas da análise de relevância proposta pela metodologia PROKNOW70	
Figura 38 – Distribuição dos pontos de recarga de baterias .....	76
Figura 39 – pontos dos clientes na cidade de Pequim, China.....	78
Figura 40 – Número de veículos pesados elétricos vendidos nos últimos anos .....	85
Figura 41 – Capacidade das estações de recarga disponíveis nos países .....	86
Figura 42 – variação do nível de emissão e da velocidade média.....	91
Figura 43 – Cenário de aplicação do método proposto por Wang et al (2022).....	93
Figura 44 – Sinalização referente a zona de baixíssima emissão em Londres, Reino Unido .....	94
Figura 45 – Países com iniciativas de taxaço de carbono.....	96
Figura 46 – Relação entre emissões e nível de serviço de entregas .....	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos problemas de roteirização pura .....	57
Quadro 2 – Banco de dados inicial .....	68
Quadro 3 – Revisão das bibliografias duplicadas.....	69
Quadro 4 – Portifólio final da Revisão Sistemática .....	71
Quadro 5 – Origem dos trabalhos selecionados .....	72
Quadro 6 - Mapeamento dos critérios encontrados nas bibliografias .....	79
Quadro 7 – Resumo da avaliação de aplicabilidade dos critérios de roteirização verde .....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos relacionados .....	26
Tabela 2 – Composição do PIB do transporte entre 2007 e 2016. ....	35
Tabela 3 - Quantidade de veículos eletrificados vendidos em 2023 – 5 maiores fabricantes .....	46

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores  
ABVE - Associação Brasileira do Veículo Elétrico  
ANP - Agência Nacional do Petróleo  
CAMEX - Câmara de Comércio Exterior  
CD - Centro de Distribuição  
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo  
CNT - Confederação Nacional do Transporte  
CO<sub>2</sub> - Dióxido de carbono  
ENR – Energia não-renovável  
ESG - *Environmental, Social and Governance*  
FGV - Fundação Getúlio Vargas  
F-GVRP - *Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem*  
GEE - Gases do Efeito Estufa  
GG – Greenhouse Gases  
GJ - Gigajoule  
GPS - *Global Positioning System*  
GVRP - *Green Vehicle routing problem*  
G-VRP - *Green Vehicle Routing Problem*  
IEA - *International Energy Agency*  
IPVA - Imposto sobre veículos automotores  
KWh - Quilowatt-hora  
LR – Logística reversa  
OWID - *Our World in Data*  
PCV - Problema do Caixeiro Viajante  
PRP – Problema do roteamento da poluição  
PIB - Produto Interno Bruto  
PRP - *Polution Routing Problem*  
PRV - Problema da Roteirização de Veículos  
RCLE - Regime de Comércio de Licenças de Emissões  
RFID - *Radio-Frequency Identification*

VCA - Veículo com combustível alternativo

VCI – Veículo de combustão interna

VE - Veículo elétrico

VEH – Veículo elétrico híbrido

VEHP – Veículo elétrico híbrido plug-in

VRPRL - *Vehicle Routing Problem - Reverse Logistics*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	16
1.1.	OBJETIVOS .....	21
1.1.1.	OBJETIVO GERAL .....	21
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	22
1.1.3.	JUSTIFICATIVA .....	22
1.2.	LIMITAÇÕES .....	23
1.3.	METODOLOGIA .....	23
1.3.1.	CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA .....	23
1.3.2.	PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO TRABALHO .....	24
1.4.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	25
1.5.	ADERÊNCIA AO PPGTG .....	26
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	27
2.1.	SETOR DE TRANSPORTES.....	27
2.1.1.	TRANSPORTE DE CARGAS .....	31
2.1.2.	TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL .....	34
2.2.	MEIO AMBIENTE E O SETOR DE TRANSPORTES .....	36
2.2.1.	EMISSÕES DE POLUENTES PELO MUNDO .....	36
2.2.2.	EMISSÕES DE POLUENTES NO BRASIL .....	38
2.2.3.	EMISSÕES POR MODO DE TRANSPORTE .....	40
2.2.4.	INICIATIVAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES .....	43
2.3.	ROTEIRIZAÇÃO DE CARGAS .....	49
2.3.1.	HISTÓRICO .....	51
2.3.2.	TIPOS DE ROTEIRIZAÇÃO.....	52
2.3.3.	ROTEIRIZAÇÃO VERDE.....	59
3.	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA .....	67
3.1.	DEFINIÇÃO DOS EIXOS DE PESQUISA E SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE 67	
3.2.	SELEÇÃO DAS BASES DE DADOS .....	68
3.3.	ARMAZENAGEM E PROCESSO DE FILTRAGEM INICIAL .....	68
3.4.	VERIFICAÇÃO DA RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E DISPONIBILIDADE ...	69
3.5.	CRIAÇÃO DO PORTFÓLIO FINAL DA REVISÃO SISTEMÁTICA .....	71
3.6.	ANÁLISE DA LISTA DE TRABALHOS FINAL .....	73

4.	ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE APLICADOS A REALIDADE BRASILEIRA .....	79
4.1.	MAPEAMENTO DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE .....	79
4.2.	CATEGORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE.....	81
4.2.1	VEÍCULOS E INFRAESTRUTURA SUSTENTÁVEL .....	83
4.2.2	CONDIÇÕES LOCAIS.....	89
4.2.3	RESTRICÇÕES DE ACESSO E REGULAMENTAÇÕES .....	92
4.2.4	OPERAÇÕES LOGÍSTICAS SUSTENTÁVEIS .....	97
4.3.	DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE UM MÉTODO DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE ADERENTE AO CENÁRIO BRASILEIRO .....	100
5.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	102
5.1.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	104
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105

## 1. INTRODUÇÃO

O setor de transportes é atualmente um dos principais motores da atividade econômica mundial, especialmente em países em desenvolvimento (BANCO MUNDIAL, 2021). A partir da segunda metade do século XX, diversos fatores combinados geraram um intenso crescimento no setor de transportes. Alguns desses fatores são: a ausência de grandes conflitos armados entre as potências mundiais, a globalização da economia mundial, a urbanização dos países em desenvolvimento e o advento da internet e do *e-commerce* (HISTORICAL TRANSPORTATION DYNAMICS AND GLOBALIZATION NETWORKS, 2015).

Segundo o *Our World in Data* (2014), o crescimento observado nas exportações entre países durante os anos de 1950 e 2020 foi de cerca de 4000%. Além disso, o crescimento da população mundial e o processo de urbanização gerou um aumento significativo na demanda por transporte urbano. Conforme apontado por Schiffer e Schlag (2010), o desenvolvimento econômico das nações tem reforçado a necessidade de meios de transporte de curto alcance, como veículos de transporte coletivo urbano e veículos de transporte individual.

Historicamente, as demandas de transporte foram atendidas com as tecnologias até então existentes, as quais evoluíram ao longo do tempo. Desde a tração animal utilizada na pré-história com bois, cavalos e camelos na Mesopotâmia, até os atuais veículos a combustão interna que utilizam combustíveis fósseis como fonte energética, a evolução foi constante (MARTIN, 2011).

A segunda revolução industrial do século XVIII foi responsável por um grande salto tecnológico. A introdução da máquina térmica nas fábricas produziu um aumento na produtividade industrial da época e impulsionou o crescimento econômico durante os anos 1800 em toda a economia mundial. Há época, o combustível responsável pela operação dos motores que movimentavam tanto indústrias, quanto trens e os primeiros veículos de transporte individual era o carvão mineral (DA SILVA; ERROBIDART, 2019).

Em meados do século XIX, a descoberta do petróleo introduziu uma nova era de desenvolvimentos tecnológicos. Com a possibilidade de utilização desse combustível como fonte de energia, o engenheiro Nikolaus August Otto criou em 1876 o primeiro motor a combustão como conhecemos hoje e deu início à uma nova era de avanços para o setor de transportes (RAȚIU, 2003). A tecnologia dos motores que queimam combustíveis fósseis passou por diversas modificações e melhorias ao longo dos anos, porém permanece em sua essência a mesma e é a principal força motriz dos meios de transporte atuais.



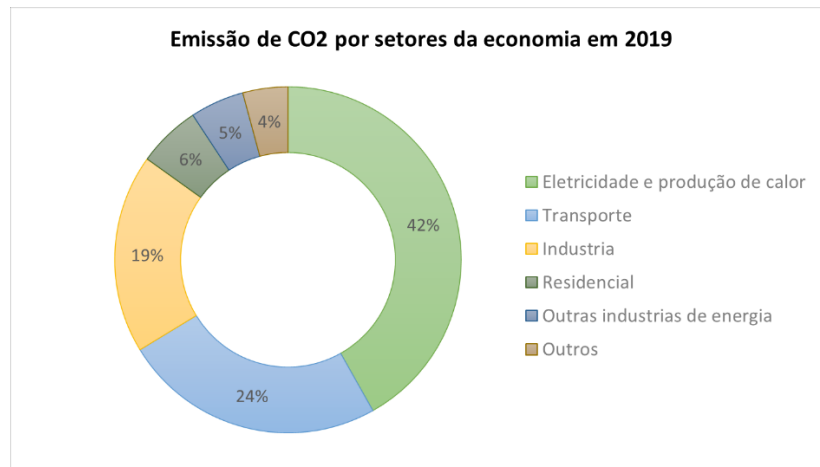
A eficiência dos motores a combustão evoluiu de forma significativa ao longo dos anos. Da mesma forma, os combustíveis evoluíram e hoje existem diversas opções disponíveis no mercado que emitem menos gases poluentes e geram menos danos ao meio ambiente. No Brasil e em outros países, a gasolina vendida nos postos de combustíveis possui em sua composição um percentual de etanol, medida adotada para reduzir a poluição gerada pela queima do combustível e baratear o custo do combustível, uma vez que reduz a participação do preço do petróleo no litro do combustível (ASSAF; SAID, 2018).

Além disso, nos últimos anos o desenvolvimento de motores híbridos e elétricos tem ajudado na redução das emissões de gases. Países europeus lideram esse movimento de eletrificação da frota e atualmente discutem no parlamento europeu uma proposta de proibição de venda de carros a combustão a partir de 2035, com a meta de atingir a neutralidade em emissões de carbono até 2050 (EPRS, 2022).

Não obstante à melhoria dos motores e da eletrificação da frota observada nos últimos anos, existem outras estratégias que permitem a redução das emissões de poluentes vinculadas ao setor de transportes. Dentre elas, a roteirização de cargas permite não só redução de custos logísticos através da otimização de rotas, mas também impacta de forma direta na redução da emissão de gases poluentes.

Segundo dados da *International Energy Agency* (2021), dentre os setores da economia, o setor de transportes é o segundo maior emissor dos gases do efeito estufa no mundo. Conforme aponta o gráfico da Figura 1, a geração de energia e calor é a principal fonte de emissão de gases, com cerca de 41% das emissões. Na sequência, o setor dos transportes corresponde a 24% do total de emissões, com uma emissão bruta de 8.222 Mt CO<sub>2</sub> (milhões de toneladas de dióxido de carbono), seguido pelos setores industrial e residencial, que juntos representam mais 25% do total de emissões.

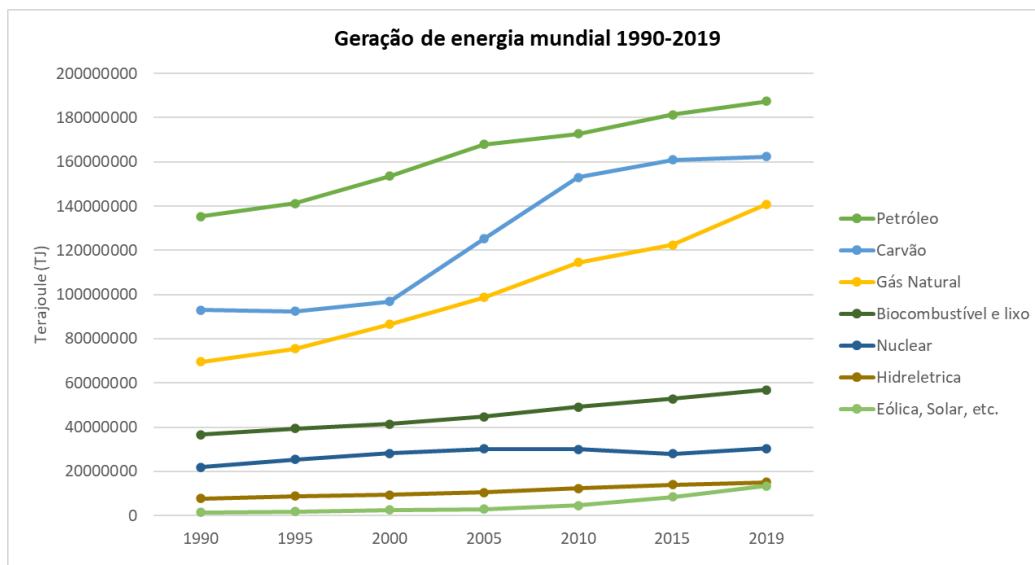
Figura 1 - Emissões de CO2 por setor da economia



Fonte: IEA, 2021

O setor de energia e produção de calor tem buscado reduzir sua parcela de contribuição através da mudança da matriz energética. Porém, observando os dados do gráfico histórico apresentado na Figura 2, fica evidente o longo percurso que existe para que as emissões mundiais sejam neutralizadas. Segundo dados da *International Energy Agency* (2022), a geração de energia por petróleo e carvão segue crescendo nos últimos 20 anos e representam um volume muito alto em relação as demais fontes de energia.

Figura 2 – Geração de energia mundial 1990-2019

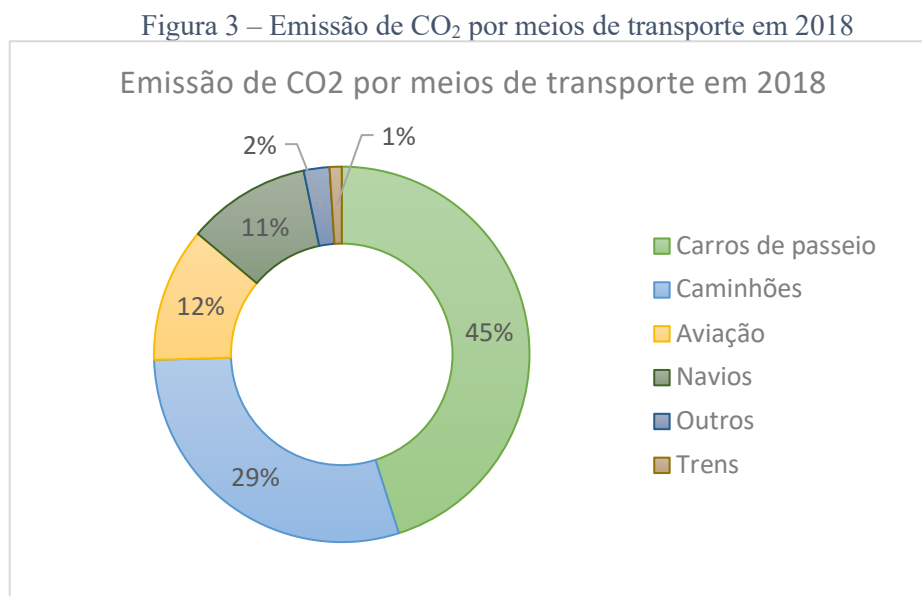


Fonte: IEA, 2022

Com base nos dados acima, a transição energética no setor de energia deverá exigir um grande esforço de toda a comunidade internacional, levando-se em consideração a participação atual das fontes tradicionais de energia e as tendências apresentadas no gráfico.

Em relação a parcela de contribuição dos transportes para as emissões de gases no mundo, existe uma divisão entre os modos de transporte que pode ser observada no gráfico da

Figura 3. Cerca de três quartos das emissões geradas pelo setor de transportes está vinculada ao transporte rodoviário, dos quais 45% estão vinculados aos veículos de passeio e 29% aos veículos de carga. Na sequência, o transporte marítimo e o aéreo representam 12% e 11% respectivamente, segundo dados da *International Energy Agency*, 2022.



Fonte: IEA, 2022

As emissões geradas pelos veículos nas diferentes modalidades de transporte estão sendo mitigadas de várias formas. De forma geral, o aumento da eficiência dos motores e o desenvolvimento de combustíveis menos poluentes têm sido o caminho seguido para redução das emissões para todos os modos de transporte (ASSAF; SAID, 2018). Para os veículos de transporte individual, a eletrificação da frota já é observada de forma clara em países desenvolvidos, com destaque para o continente europeu que já encaminhou regulamentações nessa direção.

Já o transporte de cargas apresenta desafios importantes relacionados a eletrificação da frota. A necessidade de maior autonomia para realização das viagens, o peso das baterias e o custo da tecnologia ainda impedem a adoção em massa dessa tecnologia para o transporte de cargas. Nesse sentido, a otimização das rotas é uma das principais ferramentas para reduzir a poluição gerada por esses veículos que representam grande parte das emissões do setor, juntamente com a utilização de combustíveis menos poluentes e veículos elétricos.

Os estudos sobre roteirização começaram em meados do século XVIII. Nesse período, o termo “roteirização” não era utilizado, o que passou a acontecer apenas com o advento das

ferramentas computacionais em meados do século XX (TOTH; VIGO, 2014). De toda forma, o primeiro estudo sobre planejamento de rotas registrado foi o trabalho de Leonard Euler em 1735, que ficou conhecido como o problema das sete pontes de Königsberg (BONDY; MURTY, 2008). Nele, Euler construiu um modelo matemático para saber se era possível passear pela cidade de Königsberg, na Prússia Oriental (atualmente Kaliningrado, Rússia), cruzando todas as suas sete pontes exatamente uma vez, e retornar ao ponto de partida. O trabalho deu origem a teoria dos grafos e é considerado o primeiro trabalho sobre roteirização feito.

Nas décadas seguintes outros trabalhos foram desenvolvidos e ajudaram a construir a base teórica que seria então utilizada para os estudos de roteirização com algoritmos. Um deles foi o Problema do Caixeiro Viajante apresentado pelo matemático irlandês W.R. Hamilton em 1835 (APPLEGATE, *et al.*, 2007).

Desde então, a revolução tecnológica promovida pelo aumento do acesso a computadores permitiu a adição de diversas ferramentas ao estudo da roteirização, ampliando de forma significativa o escopo de pesquisa sobre o tema. Tecnologias como a rádio frequência, GPS, RFID, rastreamento em tempo real e novos algoritmos criaram formas de roteirização. Além disso, as mudanças climáticas percebidas nos anos recentes agregaram novas preocupações e objetivos para a roteirização, além da simples busca pela redução dos custos do transporte, conforme afirma Ángel Corberán (2019):

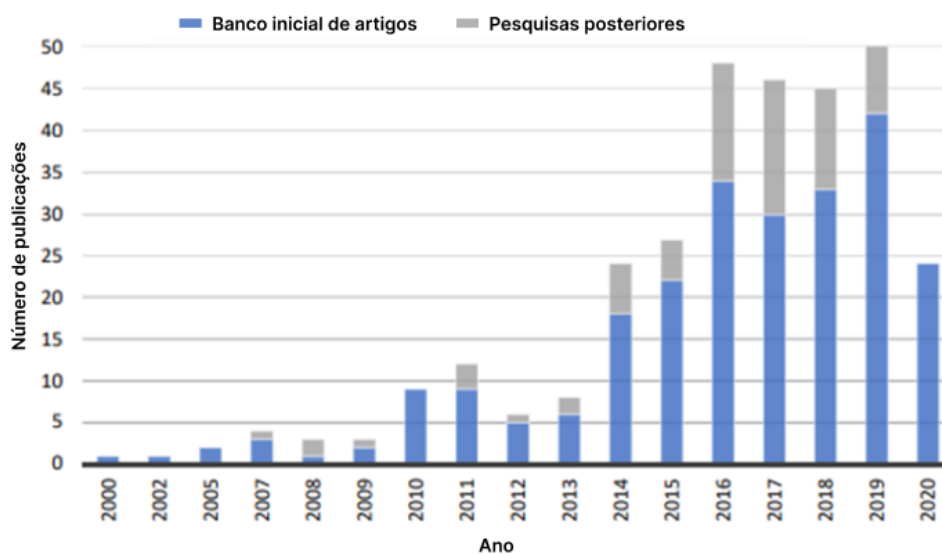
“Muitas pesquisas iniciais concentraram-se em problemas de objetivo único, que era minimizar os custos. Já houve desenvolvimentos para examinar outros objetivos, como a maximização do lucro ou a minimização das emissões de gases que originam o efeito de estufa. Algumas abordagens tentam lidar com dois ou mais objetivos usando uma abordagem multiobjetivo (CORBERÁN, 2019, P2)”.

Pensando não só em otimizar financeiramente as rotas executadas pelos veículos de transporte, mas também em reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, a partir do início do século XXI começaram a ser observados no meio acadêmico o desenvolvimento de trabalhos sobre o “*Green Routing Problem*” ou “Roteirização verde”, em tradução livre. Esses trabalhos buscaram adicionar aos algoritmos de otimização de rotas critérios relacionados à emissão de gases.

Assim como a roteirização tradicional, a roteirização verde também objetiva a redução das rotas percorridas pelos veículos. Porém, leva em consideração também aspectos diretamente vinculados ao meio ambiente, como o consumo de combustível, a poluição do ar, o tráfego, as estações de recarga para veículos elétricos e a logística reversa, por exemplo.

Conforme aponta Lin (2014), a roteirização verde pode ser dividida em quatro grandes áreas de estudo: o problema da roteirização em função da poluição; roteirização de logística reversa; recolhimento de resíduos e coleta e distribuição simultânea (também conhecido como *milk run*). Nesse contexto, observou-se que inúmeros trabalhos sobre o tema foram publicados na literatura internacional entre 2010 e 2020, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Estudos no contexto da Roteirização Verde, 2021.



Fonte: Asghari; Al-e-hashem, 2021.

Apesar do grande volume de estudos encontrados no contexto internacional, durante as buscas realizadas no escopo desse trabalho não foram encontradas referências brasileiras relacionadas ao tema. Além disso, observa-se na bibliografia que as características locais dos países como rodovias, geografia, frota e legislação são fatores relevantes no estudo da roteirização verde. Sendo assim, esta pesquisa objetiva responder à seguinte pergunta: **as técnicas atuais de roteirização verde são aplicáveis a realidade brasileira?**

## 1.1. OBJETIVOS

Para explorar o tema e responder à pergunta de pesquisa formula-se o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação, expostos abaixo.

### 1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objeto geral de estudo desse trabalho é a análise da aplicabilidade dos principais métodos de roteirização verde disponíveis na literatura mundial às características locais do

Brasil. A avaliação será feita a partir da especificação dos critérios utilizados nos métodos e em como eles são ou não influenciados pelas características locais em sua aplicação.

### 1.1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

Os seguintes objetivos específicos deverão ser alcançados durante a pesquisa:

- a. Levantar informações sobre os impactos gerados pelo setor de transportes no meio ambiente e como o assunto é abordado no cenário internacional e nacional;
- b. Realizar um estudo a respeito do estado da arte da roteirização verde e mapear quais os principais métodos utilizados para resolução do problema;
- c. Identificar os principais critérios utilizados nos métodos de roteirização verde e classificá-los a partir de suas características;
- d. Avaliar as características locais do Brasil em relação a cada um dos critérios utilizados nos métodos de roteirização verde;
- e. Propor diretrizes que indiquem quais técnicas de roteirização verde podem ser aplicadas no Brasil levando-se em consideração as características locais.

### 1.1.3. JUSTIFICATIVA

A necessidade de ações que reduzam os níveis de emissão de poluentes no setor de transportes é notória. Conforme aponta a *International Energy Agency*, (2021), o setor é o segundo maior emissor de gases poluentes na atmosfera, representando sozinho cerca de um quarto do total de emissões de CO<sub>2</sub>. Além disso, a tendência de aumento na demanda de transporte observada nas últimas décadas não deve ser revertida em um horizonte próximo.

Levando-se em consideração a grande relevância do transporte rodoviário na matriz de transporte brasileira (COLAVITE, 2015), o estudo da aplicabilidade dos métodos de roteirização verde ao contexto brasileiro pode contribuir de forma relevante nos objetivos locais de redução de emissões assumidos pelo Brasil nos últimos anos, como o de reduzir em 50% a emissão de gases do efeito estufa até 2030 e de neutralizar as emissões de carbono até 2050 (BRASIL, 2021). Concomitantemente, medidas mais robustas e de longo prazo, como a transição da frota para veículos híbridos e elétricos e o aumento da participação de outros modos de transporte também devem ser desenvolvidas em paralelo, para que sejam cumpridas as metas de redução de emissões citadas.

Quando avaliados os estudos sobre roteirização verde publicados em anos recentes, é possível observar um grande aumento no número de trabalhos publicados a respeito do tema.

Porém, a ampla maioria dos estudos foram desenvolvidos em contextos de países do hemisfério norte, levando-se em consideração características geográficas, econômicas e regulatórias de países desenvolvidos como os Estados Unidos, Inglaterra, França e Alemanha. Os países com características de desenvolvimento similares ao Brasil, como Turquia e China, também estão localizados no hemisfério norte.

Sendo assim, realizar um trabalho que busque trazer ao cenário brasileiro temas abordados na literatura internacional e adaptá-los as características locais referentes a legislação sobre poluição, tipos de combustíveis disponíveis, variedade de fontes de energia vinculadas ao transporte, características e tipo de frota e infraestrutura rodoviária poderá trazer importante contribuição para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> no contexto local.

## 1.2. LIMITAÇÕES

O estudo da roteirização apresenta diversas áreas e focos de pesquisa na bibliografia. A fim de viabilizar o desenvolvimento do trabalho, foram estabelecidas as seguintes limitações no alcance da pesquisa:

- A roteirização pode ser aplicada a diferentes cenários de transporte, desde distribuição de mercadorias (cargas), até na definição de itinerários para o transporte de passageiros, por exemplo. Nesse trabalho definiu-se que apenas a roteirização de cargas para o transporte rodoviário será abordada como tema de pesquisa. Dessa forma, a roteirização para o transporte de passageiros ou mesmo relacionada a outras modalidades de transporte não é objeto de profunda análise;
- Não serão desenvolvidas teorias matemáticas sobre o tema de roteirização;
- Não será proposto um método de roteirização verde.

## 1.3. METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentado o método científico adotado na realização do trabalho e o processo de construção do trabalho a partir do desenho de um fluxograma.

### 1.3.1. CLASSIFICAÇÃO METODOLÓGICA

Para Gil (1999, p.42), a pesquisa pode ser definida como o “processo formal e sistemático de desenvolvimento do método científico. O objetivo fundamental da pesquisa é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos”. As

pesquisas possuem diferentes tipos de classificações. A forma padrão de classificação dos trabalhos científicos, segundo aponta Gil (1999), é baseada no enquadramento em 4 características básicas: natureza, abordagem, objetivos e procedimentos técnicos.

Do ponto de vista de sua **natureza**, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa básica, a qual objetiva gerar novos conhecimentos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista (PRODANOV; FREITAS, 2013, p. 51).

Do ponto de vista de sua **abordagem**, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa qualitativa. Apesar de partir de constatações quantitativas a respeito dos impactos gerados pelo transporte no meio ambiente, as direções finais apontadas no trabalho são feitas com base em análises qualitativa das evidências coletadas ao longo da pesquisa, as quais não necessariamente podem ser medidas de forma exata através de cálculos (PRODANOV; FREITAS, 2013).

Do ponto de vista de seus **objetivos**, o presente trabalho pode ser classificado como pesquisa exploratória, a qual visa proporcionar maior familiaridade com o problema apresentado e apresentar hipóteses a partir de levantamentos bibliográficos a respeito do assunto (GIL, 1999).

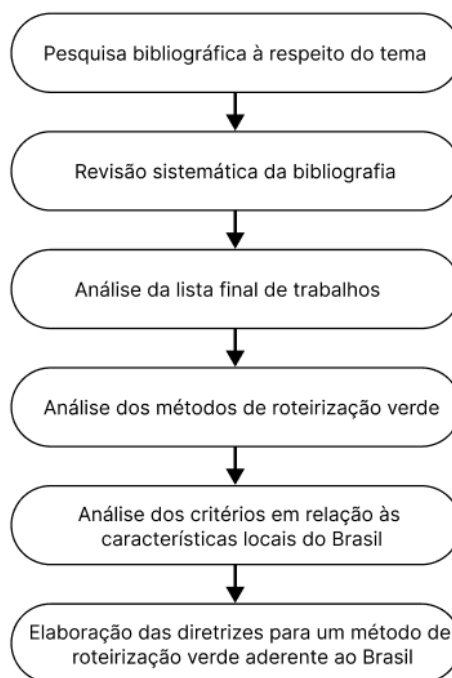
Do ponto de vista dos **procedimentos técnicos**, o trabalho adota a pesquisa bibliográfica como ferramenta base, uma vez que o desenvolvimento teórico do trabalho é construído com base na literatura já publicada a respeito do tema central do trabalho. (PRODANOV; FREITAS, 2013).

### 1.3.2. PROCESSO DE CONSTRUÇÃO DO TRABALHO

O processo de construção do trabalho foi baseado em 6 macro etapas, conforme ilustração feita no fluxograma exposto na Figura 5.



Figura 5 – Fluxograma do processo de construção do trabalho



Fonte: elaborado pelo Autor (2023).

Inicialmente, para construção de uma base de conhecimento a respeito do tema foi feita a pesquisa bibliográfica a respeito do assunto. Logo após, foi executada a revisão sistemática. Com base na lista final de bibliografias, foram executadas as análises desses trabalhos e dos métodos de roteirização abordados nos mesmos.

Em seguida, foram destrinchados os critérios utilizados nos métodos, os quais foram classificados e pesquisados de forma individual, aprofundando sua relação com aspectos locais do Brasil e como eles se relacionam com isso. Por fim, com base nessas avaliações foram elaboradas as diretrizes para proposição de um método de roteirização verde aderente ao Brasil.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A pesquisa está estruturada em 4 capítulos, conforme descrito a seguir. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, a qual traz dados e subsídios para as posteriores análises desenvolvidas no mesmo. O capítulo 3 apresenta a revisão sistemática da bibliografia disponível, relacionada ao tema de pesquisa. No capítulo 4 são apresentadas as análises efetuadas a partir de toda bibliografia coletada e, no capítulo 5, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 1.5. ADERÊNCIA AO PPGTG

Esta dissertação trata da Roteirização de cargas. Como tal, está inserida na área de concentração Sistemas de Transportes e na linha de pesquisa Planejamento de Sistemas de Transportes. No PPGTG, esta linha aborda a área de estudo que visa adequar as necessidades de transporte de uma região ao seu desenvolvimento de acordo com suas características estruturais. Isto significa implantar novos sistemas ou melhorar os existentes. Neste trabalho, realizado no âmbito do Laboratório de Transportes e Logística (Labtrans), focou-se no detalhamento dos métodos de roteirização de cargas que utilizam critérios focados na redução das emissões de gases poluentes.

No histórico do PPGTG, foram encontradas duas dissertações que guardam afinidade com o tema deste trabalho. Na Tabela 1 estão destacados os trabalhos considerados de contexto mais próximo ao desta dissertação.

Tabela 1 – Trabalhos relacionados

Ano	Autor	Título - orientador
2023	Haidi Rauber Martendal	Sistemas de transportes inteligentes e sua relação com a mobilidade urbana sustentável: proposta de framework para cidades brasileiras.
2017	Bortolazzo, Shadia Silveira Assaf	Contribuição metodológica para planejamento de transporte urbano: uma proposta sob a ótica da sustentabilidade ambiental

Fonte: elaborado pelo autor (2024).

Pode-se perceber que ambos os trabalhos abordam o tema da sustentabilidade, porém com foco no planejamento urbano e no transporte de passageiros. O trabalho de Martendal (2023) avalia um framework aplicado ao contexto das cidades brasileiras, visando a mitigação das emissões. Bortolazzo (2017), por sua vez, propõe uma contribuição metodológica para o planejamento de transporte observando os aspectos relacionados ao meio ambiente, visando também a redução de gases poluentes.

Observando-se o histórico de trabalhos do PPGTG, nota-se que a presente dissertação traz como contribuição específica a busca pela redução das emissões no transporte de cargas, além de abordar o tema da roteirização de forma pioneira dentro do escopo do PPGTG. Nesse sentido, esta dissertação pode vir a ser subsídio para novas pesquisas relacionadas a roteirização, bem como em trabalhos voltados a redução de emissões de forma geral.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica realizada sobre o tema do presente projeto de dissertação. Para isso, são elencados os principais conceitos relevantes à pesquisa, bem como assuntos correlatos.

Inicialmente apresenta-se um panorama sobre o setor de transportes no Brasil e no mundo (seção 2.1), com especial atenção para o transporte rodoviário de cargas. A relação entre o meio ambiente e o setor de transportes é abordado na sequência (seção 2.2), trazendo uma perspectiva sobre os impactos gerados pela poluição do meio ambiente no contexto global e local. Como último tema relacionado ao meio ambiente, são detalhadas as iniciativas para redução das emissões no Brasil e no mundo.

Na seção 2.3, é explorado o estado da arte da roteirização, com foco inicial na história e subsequente evolução dos métodos desenvolvidos até o momento atual. Na última parte do capítulo o tema da roteirização verde é revisado em detalhes. Inicialmente, são levantadas as principais bibliografias já publicadas sobre o assunto e, por fim, são descritos os tipos de roteirização verde existentes de acordo com os principais trabalhos publicados na área.

### 2.1. SETOR DE TRANSPORTES

O transporte ocupa hoje uma posição de grande relevância na vida da população mundial e é objeto de debate e atenção de governos ao redor do mundo. Em grandes centros urbanos, o tempo despendido em deslocamento entre casa e trabalho ocupa significativa parte do dia das pessoas (VIANNA, 2015). Além disso, recentemente, o tema da poluição gerada pelo setor também despontou como assunto relevante e vem impulsionando uma revolução tecnológica no setor. Fenômenos como as grandes névoas de poluição do ar “*smogs*” observados nos últimos anos em grandes centros urbanos chamam atenção para os impactos da queima de combustíveis fósseis (ZHANG, 2015).

Figura 6 – *Smog* observada em Pequim, China (2013).



Fonte: NBC News (2013).

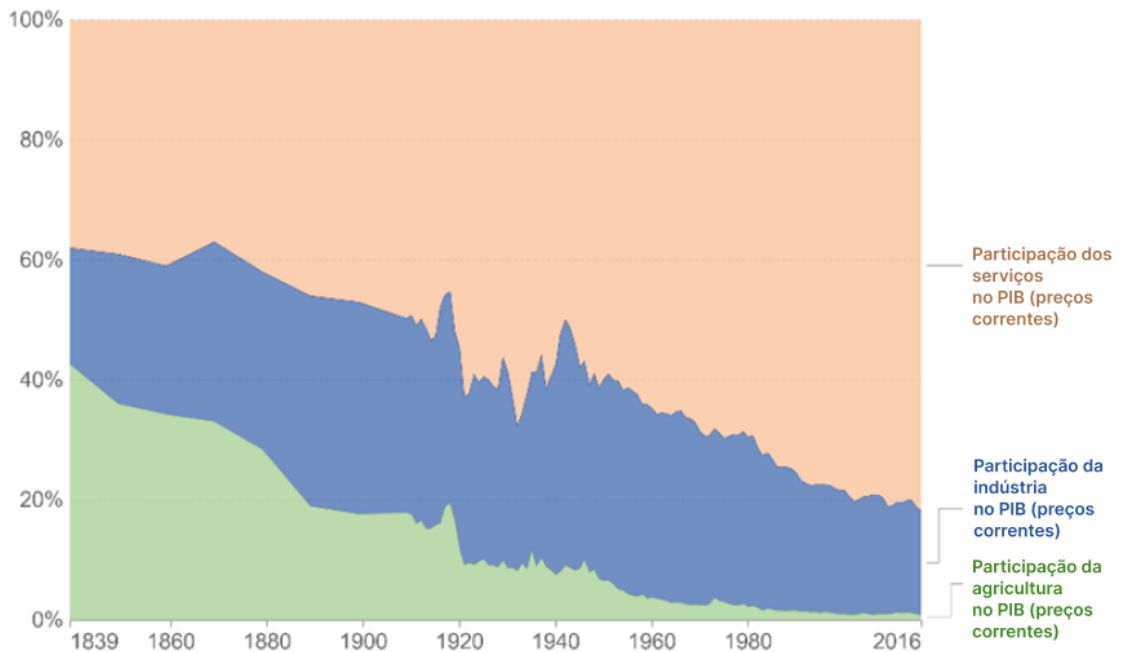
Para compreender de forma mais clara o atual cenário de emissões de poluentes e a contribuição dada pelo setor de transportes nesse processo, é apresentada uma revisão histórica da evolução da participação do setor de transportes na economia e a consequente contribuição do mesmo para os impactos ambientais observados atualmente.

Desde o início da revolução industrial, o setor terciário da economia, também chamado de setor de serviços, experimentou um aumento expressivo de participação no Produto Interno Bruto (PIB) da economia mundial em relação aos outros dois setores, o primário (agricultura) e o secundário (industrial). No gráfico apresentado na Figura 7, é possível observar a variação da contribuição dos três principais setores da economia entre os anos de 1839 e 2016 nos Estados Unidos. O setor industrial apresenta estabilidade em sua participação, representando cerca de 20% do PIB de forma constante ao longo do período do gráfico. O setor da agricultura, por sua vez, diminuiu sua participação de aproximadamente 40% em 1839 para menos de 5% em 2016.

Figura 7 – Participação dos setores da economia no PIB dos Estados Unidos entre 1839 e 2016.

### Participação no PIB por setor da economia, Estados Unidos, 1839 até 2016

Valor corrente



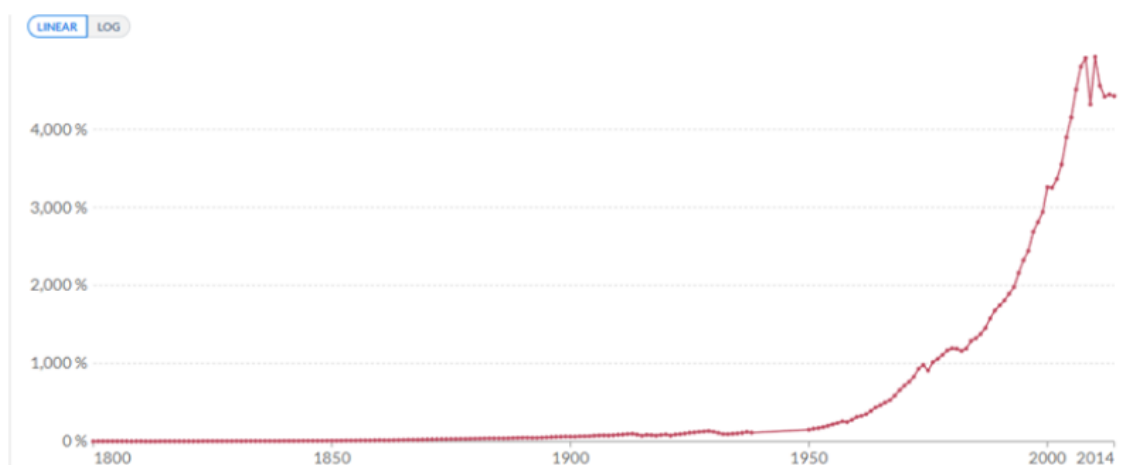
Fonte: Our World in Data, 2022.

O setor de serviços, no qual está inserido o setor de transportes, vê sua participação aumentar de 40% no início do período explorado no gráfico, para 80% do PIB em 2016. Conforme aponta Herrendorf (2014), o aumento expressivo da produtividade no setor primário reduziu a massa de empregos desse segmento da economia. Ao mesmo tempo, o setor de serviços foi responsável por ocupar esse espaço.

Nesse contexto, o transporte de cargas e passageiros experimentou significativa transformação nos dois últimos séculos. Ao longo da revolução industrial, o aumento da produtividade das indústrias aumentou a demanda por transporte confiável, mais rápido e menos custoso (MONTAGNA, 1981). Nesse sentido, o transporte ferroviário foi o responsável pela maior evolução no berço da revolução, a Inglaterra.

Já no século XXI, o fenômeno da globalização foi o grande responsável pelo aumento da demanda por transporte. O processo de abertura econômica de países como a China, Coréia do Sul e Japão no pós-guerra impulsionou o aumento nas trocas globais. Em conjunto com o crescimento econômico e desenvolvimento tecnológico de grandes potências como Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha, o aumento observado nas exportações globais atingiu 4000% desde 1950 até 2014, conforme aponta o gráfico da Figura 8 (ESTEBAN; DIANA; MAX, 2018).

Figura 8 – Crescimento nas trocas globais entre 1800 e 2014.



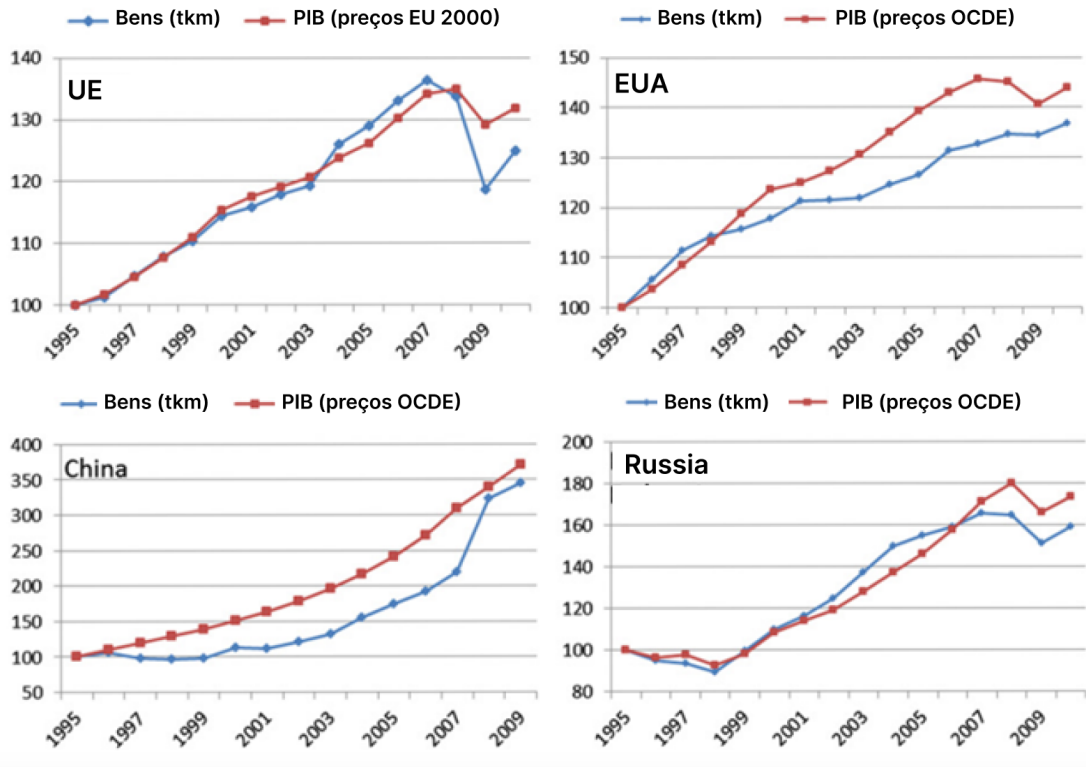
Fonte: Esteban, Diana e Max, 2018.

O aumento nas trocas globais impactou de forma direta na movimentação de mercadorias, proporcionando uma evolução nos números de transporte marítimo e aéreo. Para atender a demanda de comércio global, foram construídos os maiores portos e aeroportos da história nos grandes centros urbanos exportadores dos Estados Unidos, China, Singapura, Taiwan, dentre outros países.

Assim como os transportes marítimo e aéreo foram diretamente impactados pelo aumento das exportações, pois são o meio pelo qual as exportações são efetuadas, o desenvolvimento econômico observado no pós-guerra também alavancou de forma significativa os transportes ferroviário e rodoviário, tanto de passageiros quanto de cargas. Meersman (2013) demonstra no gráfico da Figura 9 a relação intrínseca entre o crescimento do PIB da União Europeia, Estados Unidos, Rússia e China e o crescimento da movimentação de bens através de fretes, medido em toneladas-quilometro (t-km) a partir do ano de 1995 (100) até 2011.

Figura 9- Crescimento da demanda por frete e PIB.

**Relação entre crescimento do PIB e movimentação de mercadorias (1995 = 100)**



Fonte: Meersman, 2013.

Assim como o crescimento do PIB tem a capacidade de aumentar a demanda de transporte, a queda dele também possui a mesma correlação. No ano de 2008, quando ocorreu a crise mundial do *subprime*, que provocou uma recessão global, observou-se uma consequente queda na demanda de transporte em todos os países, com exceção da China (MEERSMAN, 2013).

Apesar de apresentar similaridades em relação ao crescimento da demanda, os transportes de cargas e passageiros apresentam características e desafios distintos em relação à evolução tecnológica e redução da emissão de gases poluentes. Como definido nas limitações, o trabalho abordará apenas o transporte de cargas em detalhes.

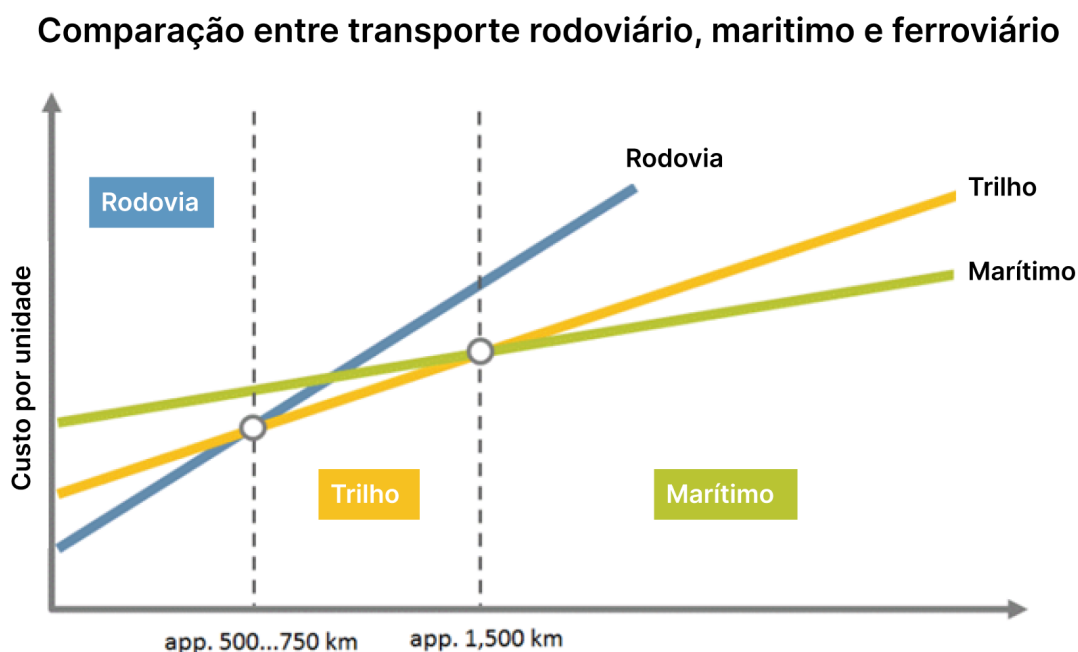
**2.1.1. TRANSPORTE DE CARGAS**

O transporte de mercadorias é uma atividade essencial para a sociedade e evoluiu ao longo da história com a descoberta de novas fontes de energia, como o carvão durante a primeira revolução industrial, que permitiu a criação da máquina a vapor e da locomotiva, e o motor a combustão interna na segunda revolução industrial, que revolucionou o setor de transportes e

foi aperfeiçoado ao longo do tempo (VENTURELLI, 2017). Atualmente, os motores a combustão ainda seguem a teoria descrita por Otto em 1876, idealizador dessa tecnologia, com significativos aperfeiçoamentos em materiais de construção e combustíveis, os quais permitiram o aumento de eficiência energética e redução de emissões.

O estado da arte da tecnologia e a infraestrutura existente nos países sugere a utilização de 3 modos de transporte para a execução do deslocamento de mercadorias, a depender da distância do trajeto. O gráfico da Figura 10 aponta que o transporte rodoviário tende a apresentar maior eficiência para deslocamentos até aproximadamente 500 a 750 quilômetros. O transporte ferroviário, por sua vez, tende a ser mais eficiente em distâncias entre 750 a 1500 quilômetros. Por fim, a partir dessa quilometragem, o transporte marítimo tende a ser o mais eficiente, não muito distante do ferroviário, cujas curvas são bastante próximas (PELTOKOSKI, 2016).

Figura 10 – Comparação de eficiência entre Rodovia, Ferrovia e Cabotagem em função da distância



Fonte: Peltokoski (2016).

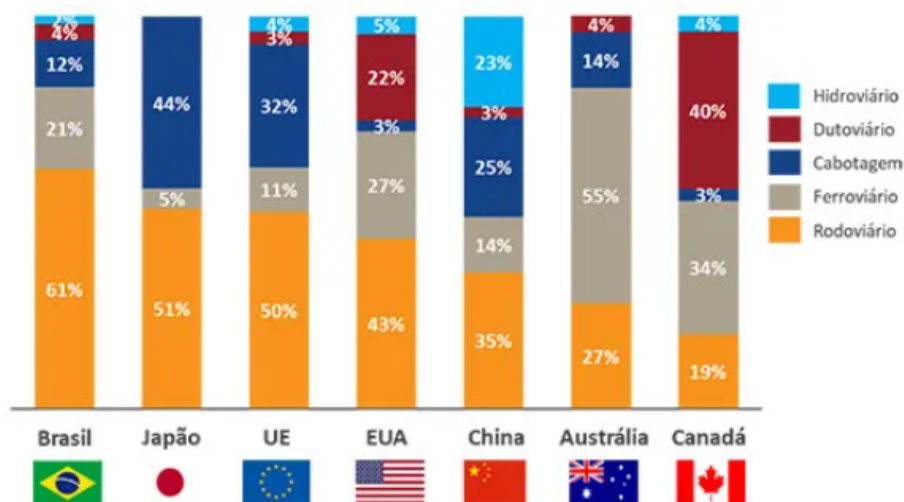
Segundo Peltokoski (2016), as distâncias apontadas no gráfico levam em consideração o custo por unidade de transporte e são justificadas pelo custo de construção, manutenção e operação da infraestrutura desses modos.

Observando-se a divisão de modos de transporte dos maiores países do mundo, cujas dimensões se assemelham as do Brasil, nota-se uma evidente diferença: todos os países, à exceção do Brasil, possuem uma malha ferroviária mais relevante em relação aos demais modos de transporte (Figura 11). Além disso, o percentual de 61% de atendimento da demanda de



transporte através do modo rodoviário do Brasil é significativamente maior que o observado nos demais países (COLAVITE, 2015).

Figura 11 – Matriz de transporte em países continentais



Fonte: Alvarenga (2020)

A alta relevância do modo ferroviário apresentado pelos países, com exceção do Brasil, é explicada pela alta demanda de transporte de *commodities* desses países e das grandes distâncias desde os centros geradores desses produtos até os portos. Nesse sentido, conforme apontado pelo gráfico da Figura 10, a modalidade ferroviária tende a ser a mais competitiva, considerando distâncias de até 1.500km (PELTOKOSKI, 2016).

A participação de 61% do modo rodoviário na matriz de transportes do Brasil evidencia duas coisas: a grande necessidade de desenvolvimento de ferrovias para escoamento da produção de *commodities* brasileira, para que a distribuição da matriz fique mais equilibrada e perto do ideal, e a **necessidade de otimização do transporte rodoviário**, considerando sua relevância atual.

Nesse sentido, a importância do desenvolvimento do presente trabalho é reforçada, uma vez que o transporte rodoviário de cargas no Brasil possui a maior participação proporcional na matriz de transportes em comparação a países com dimensões semelhantes. Nesses, a infraestrutura é mais bem distribuída e a relevância do setor rodoviário é menor.

No Canadá, por exemplo, menos de 20% da matriz de transporte é direcionada ao modo rodoviário (COLAVITE, 2015). Assim, a roteirização de cargas visando a redução das emissões apresenta menor relevância, considerando o possível impacto gerado pela redução de emissões. É importante observar também que países como Canadá e Rússia possuem vastas áreas de seu território cobertas de gelo, o que impede o desenvolvimento de rodovias, pois essas ficam

intransitáveis no inverno. Outro fator que também é notável é o relevo desses países, bem como da Austrália, que possui um vasto deserto em sua região central. O relevo plano permite o desenvolvimento facilitado de ferrovias, uma vez que a necessidade de construção de pontes e túneis é menor. O Brasil, por sua vez, possui a Serra do Mar em praticamente toda costa, o que encarece significativamente a implantação de ferrovias nas regiões mais povoadas e com maior movimentação de cargas.

No próximo capítulo serão abordados em detalhes os números do transporte rodoviário de cargas no Brasil.

### 2.1.2. TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE CARGAS NO BRASIL

Como demonstrado na seção anterior, a matriz de transportes brasileira apresenta maior relevância no setor rodoviário em relação aos demais modos de transporte. Tratando-se especificamente do transporte de cargas, os números que essa representatividade percentual imprime na realidade tornam ainda mais evidente a importância desse modo do transporte para o desenvolvimento do país.

O transporte, considerando a atuação de todos os seus modos, é um relevante setor gerador de empregos. São mais de 200 mil empresas no país atuando no setor, com cerca de 2 milhões e meio de empregos com carteira assinada. De acordo com o estudo Transporte em números de 2019 da Confederação Nacional do Transporte - CNT, 70% dos empregos formais do setor estão no transporte terrestre (CNT, 2019).

Além de abrigar a maior quantidade de empregos, o PIB do transporte também é majoritariamente vinculado ao transporte terrestre. Conforme aponta a Tabela 2, cerca de 50% do PIB do transporte está relacionado ao transporte rodoviário. Além disso, outra parcela de 23,2% está relacionada ao armazenamento e atividades auxiliares ao transporte que também estão, em grande parte, vinculadas ao transporte rodoviário, visto sua grande representatividade na matriz de transporte brasileira, conforme apontado na seção anterior.

Tabela 2 – Composição do PIB do transporte entre 2007 e 2016.

	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Transporte, armazenagem e correio	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
Transporte terrestre	59,0%	59,5%	59,2%	59,1%	57,6%	60,0%	59,7%	62,0%	59,0%	57,8%
Transporte ferroviário e metroviário	6,1%	6,8%	5,8%	4,9%	4,8%	4,7%	4,7%	4,5%	5,0%	5,7%
Transporte rodoviário	49,6%	49,2%	49,3%	50,1%	47,3%	49,4%	48,8%	51,8%	47,6%	45,6%
Transporte rodoviário de passageiros	22,2%	21,2%	21,2%	20,0%	19,7%	19,1%	18,6%	17,2%	18,5%	18,2%
Transporte rodoviário de cargas	27,4%	28,0%	28,1%	30,0%	27,6%	30,3%	30,3%	34,6%	29,1%	27,4%
Transporte dutoviário	3,4%	3,5%	4,0%	4,0%	5,5%	5,9%	6,1%	5,7%	6,4%	6,5%
Transporte aquaviário	3,1%	2,8%	2,9%	3,3%	2,9%	3,2%	3,5%	3,5%	4,3%	4,5%
Transporte aéreo	4,6%	4,8%	5,7%	5,8%	6,7%	5,2%	5,6%	5,3%	6,0%	5,7%
Armazenamento e atividades auxiliares ao transporte	23,2%	23,5%	23,2%	23,1%	24,4%	24,3%	24,4%	22,9%	24,0%	24,9%
Correios e outras atividades de entrega	10,0%	9,5%	9,1%	8,7%	8,4%	7,3%	6,8%	6,3%	6,6%	7,1%

Fonte: CNT (2019).

De acordo com o anuário CNT 2021, existem atualmente 110.812.821 veículos registrados no Brasil. Em relação a 10 anos atrás (2011), o crescimento observado foi de 57,1%, quando existiam 70.543.535 registros. Desses mais de 110 milhões de veículos, os automóveis representam 53,3%, motocicletas 22,2%, caminhões 2,6% e ônibus 0,6%.

Quando se fala no transporte de cargas, existem 219.956 empresas de transporte registradas, 435 cooperativas e 724.098 motoristas autônomos. Segundo o estudo, a frota total de veículos de carga é de 2.270.861, sendo 1.382.651 veículos vinculados a empresas de transportes, 859.729 registrados a autônomos e 28.481 veículos de cooperativas (CNT, 2021).

Levando-se em consideração os números apresentados, revela-se fundamental a análise e estudo de formas de otimizar a eficiência do transporte de cargas no Brasil. Apesar do aumento nos investimentos privados observados em ferrovias nos últimos anos, a partir da aprovação da nova Lei das Ferrovias aprovada em 23/12/2021 (BRASIL, 2021), a participação do setor rodoviário no transporte de cargas no Brasil permanecerá relevante nas próximas décadas. Assim sendo, no próximo capítulo serão explorados os impactos do setor de transportes no meio ambiente por meio das emissões de gases poluentes, assim como serão exibidas as iniciativas em desenvolvimento para mitigar esses impactos.

## 2.2. MEIO AMBIENTE E O SETOR DE TRANSPORTES

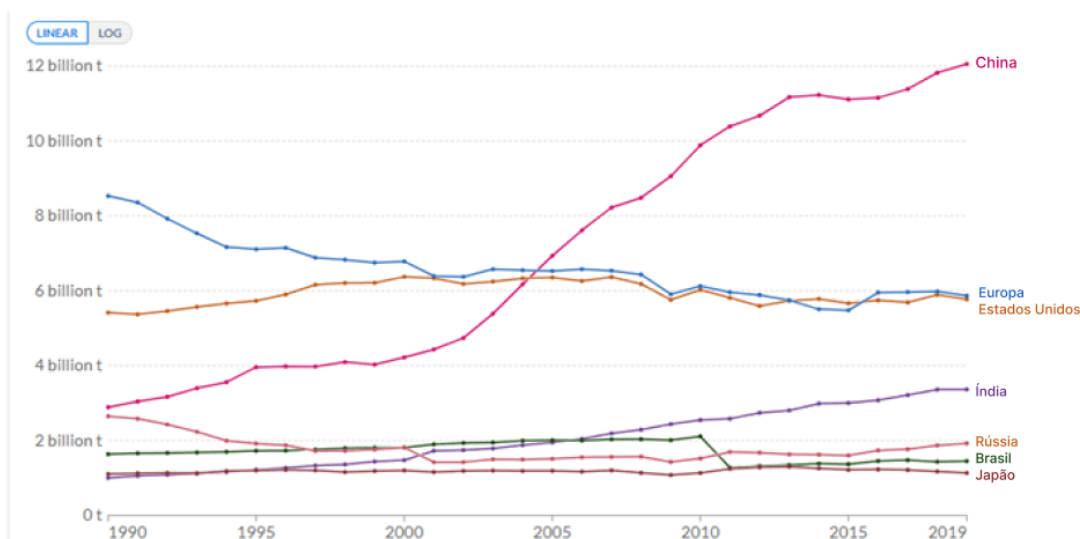
O desenvolvimento econômico observado nas décadas posteriores ao fim da segunda guerra mundial elevou de forma significativa a emissão de gases poluentes na atmosfera. Esse processo está diretamente relacionado ao aumento da demanda por energia, bens de consumo e transporte.

Nas próximas seções serão analisadas as emissões de poluentes geradas pelas principais atividades econômicas no Brasil e no mundo, observando-se os anos atuais e analisando a perspectiva histórica. Por fim, será realizada uma análise com foco no setor de transportes e em seus impactos ao meio ambiente.

### 2.2.1. EMISSÕES DE POLUENTES PELO MUNDO

Os dados observados a respeito das emissões de gases de efeito estufa (GEE) apontam que os países com os maiores Produtos Interno Bruto do planeta são aqueles que emitem a maior quantidade de gases poluentes para a atmosfera, segundo o *Our World in Data* – OWID (2022). De forma simplificada, atualmente a China é responsável pela maior parte dessa emissão, com um total de 12 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente emitidos em 2019 (27% do total, aproximadamente), seguido pelos Estados Unidos e Europa com cerca de 5 bilhões de CO<sub>2</sub> equivalente cada um. Na sequência, Índia, Rússia e Brasil aparecem como principais emissores, seguidos de perto pelo Japão (Figura 12).

Figura 12 – Emissões de gases de efeito estufa por país, 1990 a 2019.  
Emissões medidas em CO<sub>2</sub> equivalente

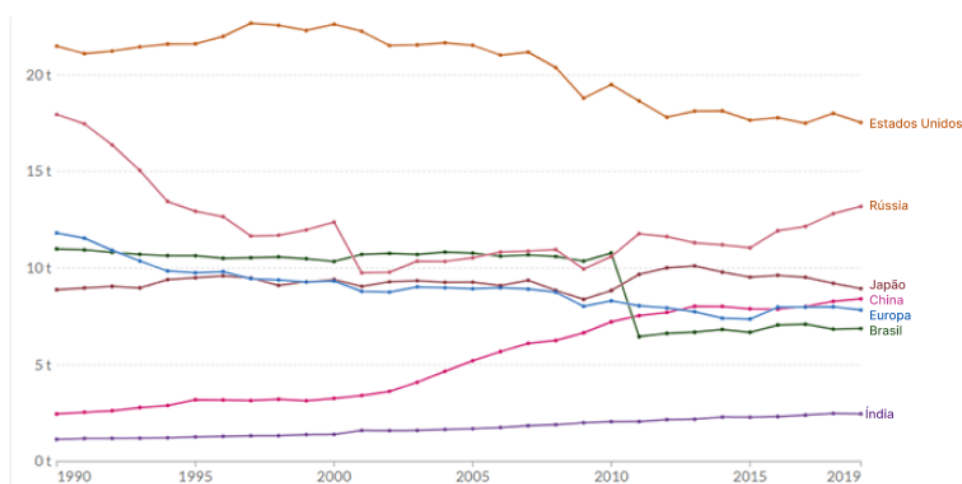


Fonte: Our World in Data, 2022.

O gráfico acima também evidencia a evolução histórica dessas emissões. Enquanto a China apresentou um salto no volume de emissões após os anos 2000 devido à abertura econômica e consequente crescimento de sua economia, países desenvolvidos da Europa, os Estados Unidos e o Japão apresentam uma curva mais estável nos últimos anos, com destaque para a redução das emissões dos países europeus. Estes já estão migrando para uma economia verde a partir de incentivos governamentais que serão abordados nos próximos capítulos.

Outra análise que deve ser feita é o volume de emissões levando-se em consideração o tamanho das respectivas populações dos países, a fim de dar maior equivalência ao gráfico. Nesse caso, é possível observar que os Estados Unidos e a Rússia são os países com maior volume de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente per capita. A China, por sua vez, ocupa a quarta posição, próxima a Europa e ao Brasil (OWID, 2022).

Figura 13 – Emissões de gases do efeito estufa per capita por país, 1990 à 2019.  
Emissões medidas em CO<sub>2</sub> equivalente



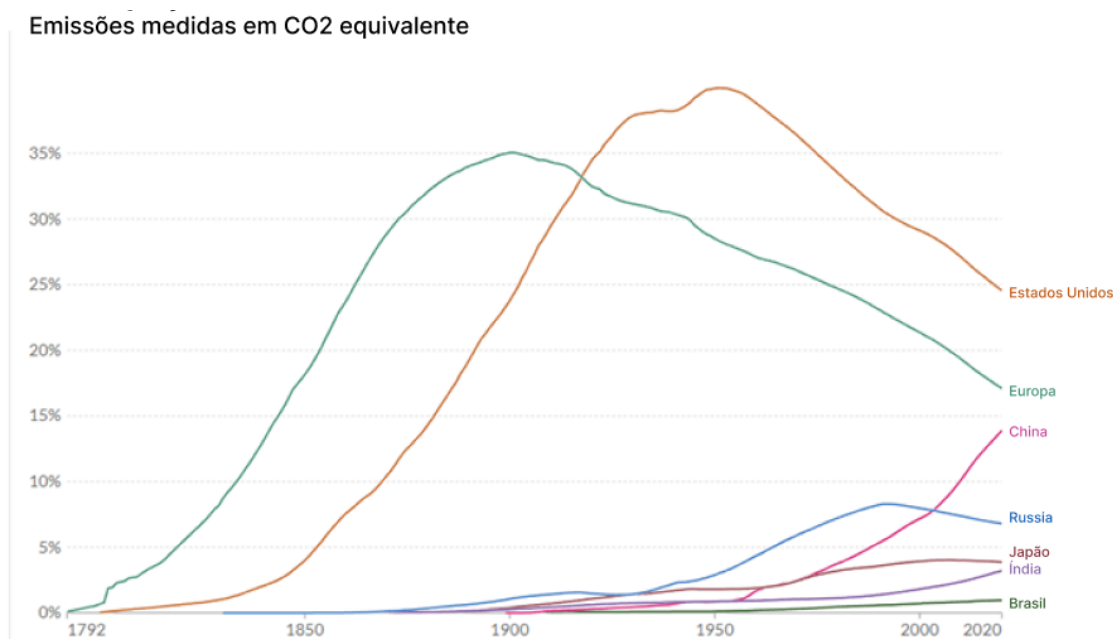
Fonte: Our World in Data, 2022.

Sob esse ângulo, evidenciam-se duas coisas:

- Os Estados Unidos apresentam, de forma isolada, a maior quantidade de emissões por habitante;
- A Índia apresenta um volume muito baixo de emissões relativas.

Por fim, outra análise que também deve ser levada em consideração é a perspectiva histórica das emissões. Considerando que historicamente o desenvolvimento econômico das nações está ligado ao consumo de energia barata através da queima de carvão e petróleo, e que países desenvolvidos já fizeram o uso desses combustíveis por muitos anos, o gráfico abaixo demonstra quais são os países que mais emitiram gases ao longo do tempo e são hoje os grandes responsáveis pelos impactos observados no meio ambiente (OWID, 2022).

Figura 14 – Emissões de gases de efeito estufa sob a perspectiva histórica, 1790 a 2020.



Fonte: Our World in Data, 2022

Nesse sentido, observa-se que os Estados Unidos e a União Europeia são os dois maiores emissores de CO<sub>2</sub>, seguidos por China, Rússia e Japão. É possível também visualizar uma acentuada curva ascendente de China e Índia (em menor escala), devido a suas grandes populações e crescimento econômico dos últimos anos, os quais produziram maiores níveis de emissões. Apesar da grande participação atual desses países, com destaque para a China, esses ainda não atingiram, no acumulado das emissões, os níveis de poluição gerados pelos países europeus e pelos Estados Unidos. O Brasil, no contexto histórico, possui uma baixa representatividade, próximo de 1% do total de emissões (Figura 14).

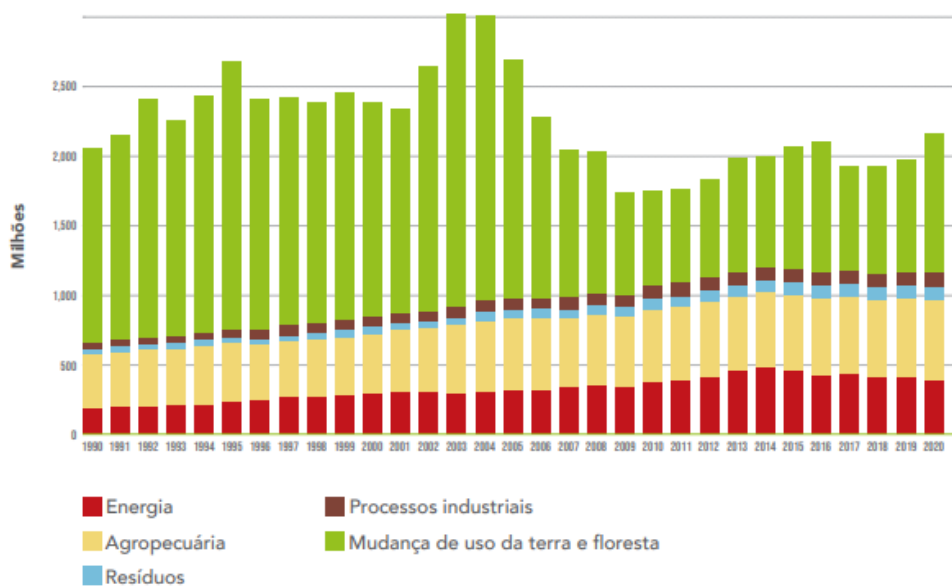
### 2.2.2. EMISSÕES DE POLUENTES NO BRASIL

Ao analisar o cenário local de poluição ambiental, é possível observar que o Brasil apresenta características distintas de grande parte dos países mencionados no tópico anterior. Apesar de apresentar uma matriz de transporte majoritariamente rodoviária, o que indica uma alta emissão de poluentes, os principais responsáveis pelas emissões de gases de efeito estufa no país não estão relacionados a queima de combustíveis fósseis, seja para geração de energia ou para o transporte.

Conforme aponta o Observatório do Clima, em 2022, no estudo Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020, os maiores

responsáveis pelas emissões de gases poluentes são a mudança do uso da terra e floresta (desmatamento e queimadas) e a agropecuária. O gráfico da Figura 15 indica que o volume total de emissões de gases de efeito estufa no Brasil chegaram ao pico em 2003, com 3 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, onde 2 bilhões são referentes a queimadas e desmatamento e 1 bilhão é dividido entre agropecuária, indústria, energia e resíduos.

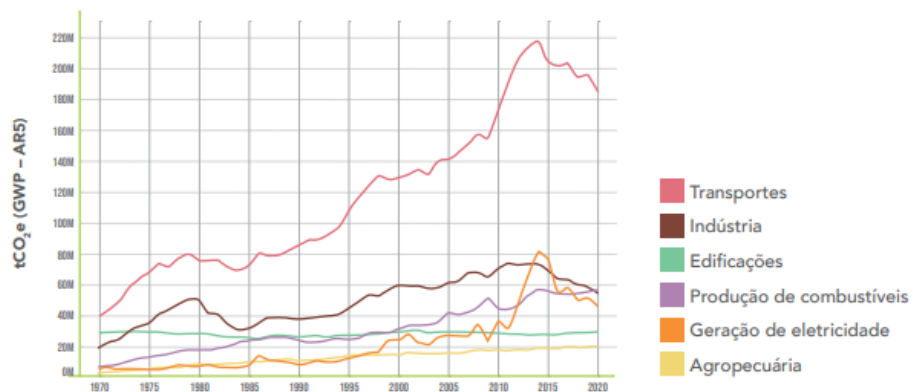
Figura 15 – Emissões de gases de efeito estufa do Brasil de 1990 a 2020 (GtCO<sub>2</sub>e)



Fonte: Observatório do Clima, 2022.

A parcela referente a energia é onde as emissões do setor de transportes estão inseridas. Dentro do escopo energético, os transportes são os maiores responsáveis pelas emissões, seguidos pelo setor industrial, produção de combustíveis e geração de energia (DO CLIMA, 2022).

Figura 16 – Emissões de gases de efeito estufa nas atividades do setor de energia de 1970 a 2020.



Fonte: Observatório do Clima, 2022.

O gráfico da Figura 16 aponta um expressivo aumento das emissões do setor de transportes nos últimos anos, com uma pequena queda após 2015. Essa movimentação acompanha a variação registrada pelo PIB brasileiro nos últimos anos. Essa correlação já foi abordada na seção 2.1 e também pode ser observada no Brasil. O incremento da atividade econômica observada nos anos 2000 aumentou a demanda por transportes que consquentemente provocou o aumento das emissões de poluentes, tendo em vista que a matriz de transportes brasileira é altamente poluente (rodoviária). Na próxima seção será abordado como cada modo de transporte se comporta no que diz respeito a emissão de gases.

### 2.2.3. EMISSÕES POR MODO DE TRANSPORTE

Os diferentes modos de transporte, tanto de passageiros quanto de carga, possuem diferentes taxas relativas de emissão. A escolha da matriz de transporte pode impactar nos níveis de emissão de uma cidade, estado ou país. Nesse sentido, o uso do transporte coletivo ao invés do transporte individualizado auxilia na redução do volume de emissões do transporte de passageiros. Um ônibus que transporta 70 pessoas equivale a 50 automóveis em deslocamento, considerando-se que cada veículo possua 1,5 pessoas. Sendo assim, o simples uso do transporte coletivo reduz as emissões de poluentes significativamente (DE CARVALHO, 2011).

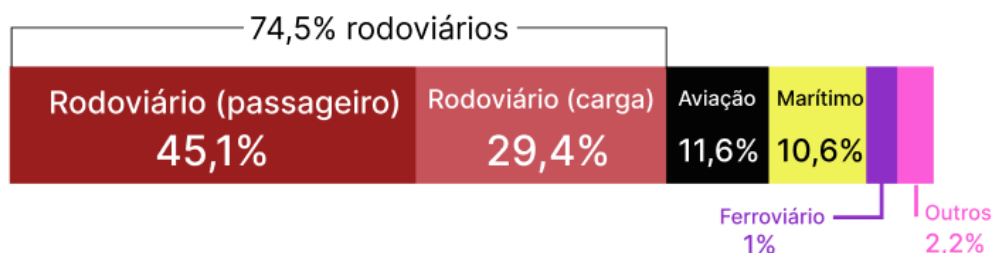
Segundo dados do *Our World in Data* (2022) para as emissões globais de CO<sub>2</sub> equivalente referentes ao setor de transportes, quase 75% das emissões são geradas pelo transporte rodoviário, seja de passageiros ou de carga. Na sequência temos a aviação (majoritariamente de passageiros), o transporte marítimo (majoritariamente de cargas) e o ferroviário (Figura 17).



Figura 17 – Emissões de CO2 equivalente por modo de transporte no mundo em 2018

### Emissões globais de CO2 do setor de Transportes

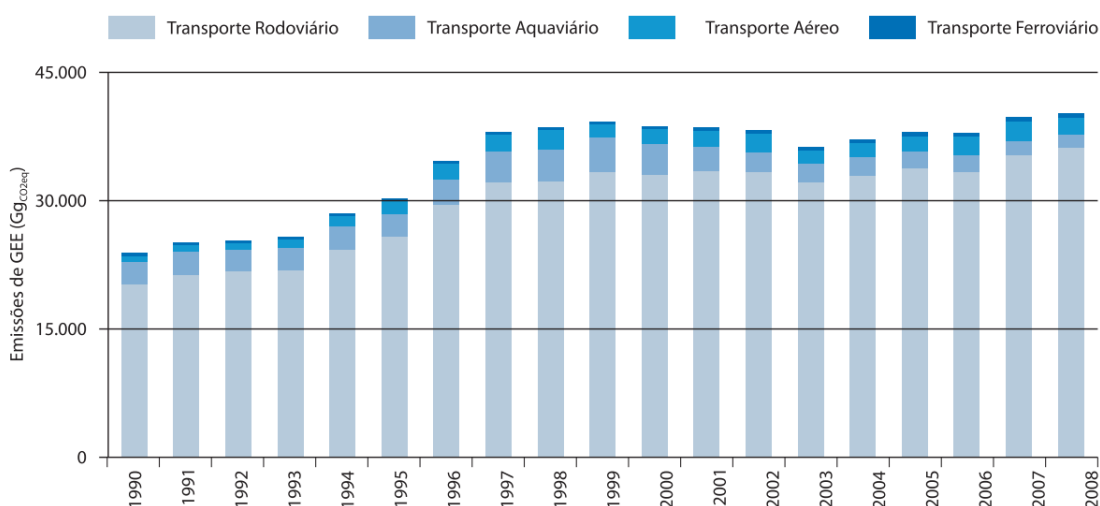
Baseado em dados de 2018, quando foram emitidos 8 bilhões de toneladas de CO2.



Fonte: Our World in Data, 2020.

No Brasil, as emissões de CO<sub>2</sub> equivalente do setor de transporte se comportam um pouco diferente. Devido a matriz focada no transporte rodoviário – diferente das principais nações poluidoras do mundo – a maior parte das emissões advém desse setor. No estado de São Paulo, entre 1990 e 2008, mais de 90% das emissões foram oriundas do modo rodoviário. Observou-se também nesse período um aumento da participação do setor aéreo e uma diminuição do aquaviário. Porém, a relevância do transporte rodoviário permaneceu (CETESB, 2014).

Figura 18 – Emissões de gases de efeito estufa por modal de transporte entre 1990 e 2008 no Estado de São Paulo

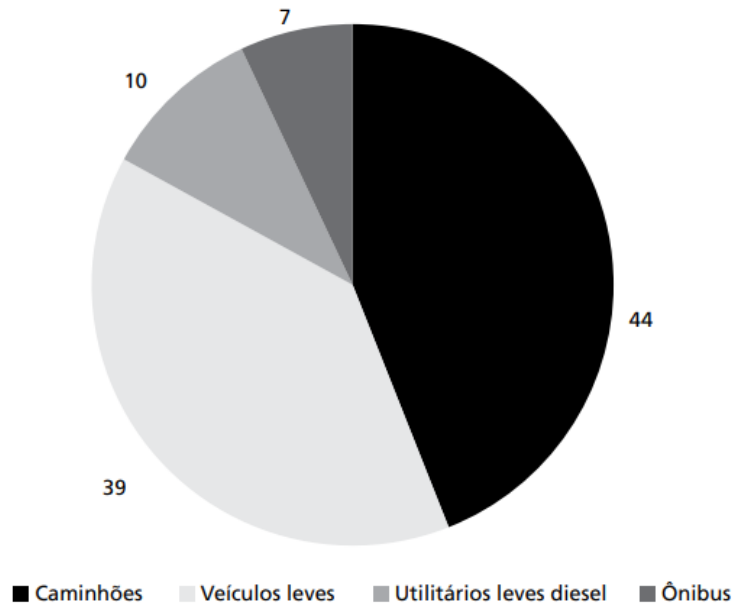


Fonte: CETESB, 2014.

Dentre as emissões apenas do setor rodoviário, a divisão observada no levantamento mundial do *Our World in Data* (2022), onde 60% das emissões rodoviárias referem-se ao transporte de passageiros e 40% ao transporte de cargas se difere do Brasil. Segundo Carvalho (2011), 51% das emissões geradas nas rodovias brasileiras são oriundas de veículos de carga

(caminhões + utilitários leves diesel) e 49% de transporte de passageiros (veículos leves + ônibus).

Figura 19 – Emissões de CO<sub>2</sub> equivalente no transporte no Brasil, 2006.

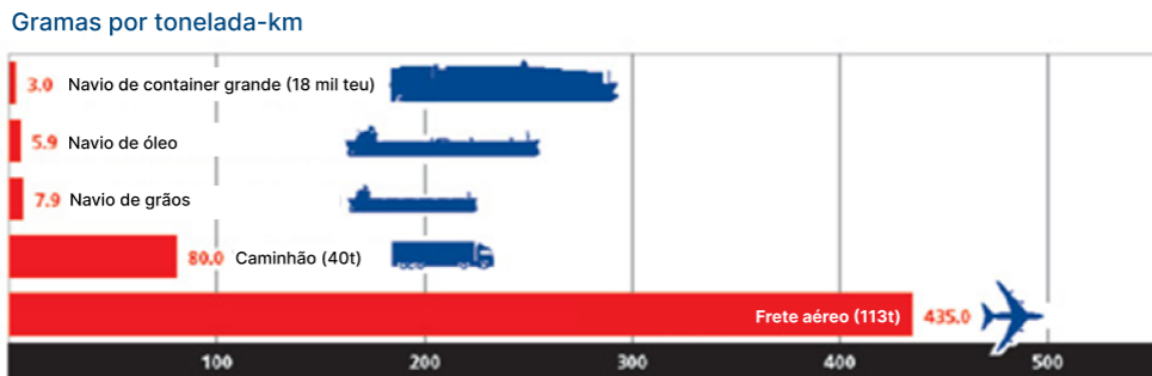


Fonte: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.

O gráfico da Figura 19 reforça as evidências já apresentadas nas seções anteriores referentes a (1) relevância do setor rodoviário e, em específico, (2) do transporte de cargas.

Lindstad (2011) apresenta em seu trabalho uma comparação das emissões de gases emitidas por cada modo de transporte de carga, considerando a unidade de medida “gramas emitidas por tonelada-km”. Nesse gráfico, é possível entender qual dos modos de transporte emite a maior quantidade de poluentes para transportar a mesma quantidade de peso pela mesma distância.

Figura 20 – Comparação da emissão de CO<sub>2</sub> por modos de transporte



Fonte: Lindstad, 2011.

O gráfico da Figura 20 evidencia que o frete aéreo é, por muito, o mais poluente. Para transportar uma tonelada por um quilometro, são emitidas 435 gramas de CO<sub>2</sub> equivalente. O transporte rodoviário por sua vez emite 80% menos poluentes, com 80 gramas de CO<sub>2</sub>eq por tonelada-km. Por fim, o transporte marítimo aparece com níveis de emissão 10 vezes menores do que o rodoviário (LINDSTAD, 2011).

A matriz de transporte brasileira direcionada historicamente ao transporte rodoviário indica uma necessidade de otimização de sua eficiência, tanto para redução dos custos logísticos, mas também para mitigação da poluição. Nesse sentido, na próxima seção serão exploradas iniciativas observadas ao redor do mundo visando a redução das emissões.

#### 2.2.4. INICIATIVAS PARA REDUÇÃO DAS EMISSÕES

A emissão de gases do efeito estufa foi uma consequência inevitável do crescimento econômico das nações ao longo das últimas décadas. Em países em desenvolvimento, o aumento das emissões ainda é um cenário real e deve se suceder por muitos anos, principalmente na América Latina e na África. Em países em estágios um pouco mais avançados de desenvolvimento, como na China, existe uma expectativa de aumento das emissões até meados de 2025, conforme o plano divulgado pelo governo chinês em 2021 as vésperas da COP26 (CHINA, 2021).

Nas nações desenvolvidas como Estados Unidos, Canadá, Reino Unido e Austrália, por exemplo, as metas de descarbonização são tema central das discussões políticas. Nesse sentido, os países nórdicos são notadamente destaques na elaboração e determinação de metas de redução das emissões com prazos estabelecidos para os próximos anos, com referências ao setor de transportes como um dos principais alvos das medidas.

Nesse sentido, serão abordadas na sequência medidas observadas no mundo e no Brasil que se destacam na busca da redução das emissões de gases, com foco nas medidas relacionadas ao transporte de cargas.

##### 2.2.4.1. ELETRIFICAÇÃO DA FROTA

Os veículos elétricos foram adotados por diversos países como a principal iniciativa para redução das emissões referentes ao setor de transportes. Países europeus já aprovaram leis visando a substituição da frota de veículos à combustão por veículos elétricos e almejam, em poucos anos, eliminar a fabricação de veículos movidos a gasolina e diesel. Os Estados Unidos, por sua vez, não possuem uma política federal para a adoção dos veículos elétricos em massa,

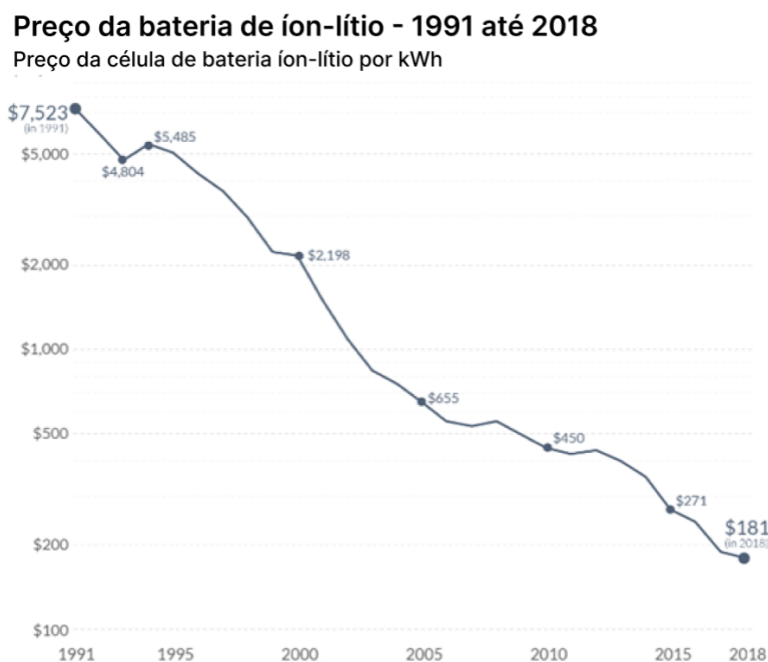
porém estados já adotam de forma independente metas de redução de emissões (ZHANG, 2020).

Diferente dos veículos a combustão interna, os veículos elétricos (VEs) não emitem dióxido de carbono. Entretanto, o aumento na frota de veículos elétricos produz um aumento na demanda de energia elétrica, que pode ser gerada de diversas maneiras, inclusive através da queima de combustíveis fósseis. Para que a introdução desses veículos traga o benefício esperado para a redução da poluição atmosférica, é preciso uma matriz energética verde. Assim sendo, a mudança da frota de veículos em um dado local é “tão verde quanto a fonte energética responsável pela geração da energia que os movem”.

Os desafios inerentes ao desenvolvimento e popularização dos veículos elétricos envolvem diversas esferas. Além da fonte de energia verde, a infraestrutura necessária para que a população possa aderir de forma massiva aos veículos elétricos também é um grande passo a ser vencido, tendo em vista a necessidade de instalação de milhares de postos de reabastecimento. O custo dos veículos também impacta na possibilidade de adesão da população, principalmente em países em desenvolvimento.

Sobre o tema de custo, o avanço da tecnologia dos carros elétricos observado nos últimos anos acompanhou a redução do custo das baterias de íon-lítio utilizadas neles. Desde 1990, o preço dessas baterias por kWh caiu 97%, reduzindo consequentemente o custo de fabricação dos veículos (ZIEGLER *et al.*, 2021).

Figura 21- Redução do custo da bateria de Íon-Lítio entre 1991 e 2018



Fonte: Ziegler et al., 2021.

Juntamente à redução do custo de fabricação, incentivos governamentais estão a cabo de acelerar o processo de eletrificação da frota. O parlamento Norueguês, por exemplo, determinou que a venda de carros de passeio e ônibus que emitem GEE será permitida apenas até 2025, e que para veículos pesados a data limite será 2030 (DEUTEN *et al.*, 2020).

No Brasil, até o final de 2023 vigorava a resolução nº 97/2015, que reduziu de 35% para zero a alíquota do Imposto de Importação para carros elétricos e movidos a células de combustível (BRASIL, 2015). A partir de 2024, o governo modificou a isenção e o imposto voltará a subir de forma progressiva entre 2024 e 2026, retornando para a alíquota original de 35% (BRASIL, 2023a). Em contrapartida, foi anunciado o programa Mobilidade Verde (MOVER), que trará benefícios fiscais para as indústrias locais que fabricarem veículos menos poluentes. Esses benefícios serão da ordem de R\$ 3,5 bilhões em 2024, R\$ 3,8 bilhões em 2025, R\$ 3,9 bilhões em 2026, R\$ 4 bilhões em 2027 e R\$ 4,1 bilhões em 2028. O programa atingirá mais de R\$ 19 bilhões em créditos fiscais (BRASIL, 2023b).

No nível regional, alguns estados também adotam incentivos relacionados ao IPVA. Em sete estados brasileiros, os proprietários de veículos movidos a motor elétricos (ou de força motriz elétrica) são isentos do IPVA e, em três estados, os veículos elétricos têm alíquota do IPVA diferenciada, segundo dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE, 2017).

Apesar desses incentivos, o percentual de participação dos veículos híbridos e elétricos nas vendas de carros no Brasil até 2022 foi de apenas 2,6% (considerando híbridos e elétricos) segundo Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (ANFAVEA), sendo 2,3% das vendas de modelo híbridos e 0,3% de veículos totalmente elétricos. Apesar de baixo, esse número representa um grande salto em relação a 2021, quando 1,6% do total de vendas foi de veículos híbridos ou eletrificados (DREHMER, 2023).

Em 2023, o mercado de veículos eletrificados passou por mais um significativo aumento de vendas, com a chegada de duas grandes fabricantes chinesas, a *Build Your Dreams* (BYD) e a *Great Wall Motors* (GWM). Apesar de novas, as marcas chegaram com preços agressivos e fizeram saltar a venda de veículos eletrificados em 91% em relação ao ano de 2022 segundo dados da ABVE. De acordo com a entidade, os emplacamentos em 2023 somaram 93.927 unidades, o que representa cerca de 5% do total de vendas no país. Só em dezembro, as vendas de carros elétricos alcançaram 16.279 unidades, crescimento de 191% em comparação com dezembro de 2022 (5.587), o que demonstra uma tendência positiva para o ano de 2024 (QUINTINO, 2024).

Segundo dados da ABVE (2024), as duas fabricantes chinesas recém-chegadas atingiram juntas 41% das vendas entre as 5 montadoras com maior número de vendas de veículos eletrificados em 2023, ranking também composto por Toyota, Chery e Volvo. Porém, apesar do crescimento, os veículos verdes representam apenas 5% do total de vendas de carros de passeio no Brasil em 2023.

Tabela 3 - Quantidade de veículos eletrificados vendidos em 2023 – 5 maiores fabricantes

Posição	Marca	Unidades vendidas	%
1	Toyota	21.042	30%
2	BYD	17.943	25%
3	Caoa Chery	11.943	17%
4	GWM	11.473	16%
5	Volvo	8.179	12%
	<b>Total</b>	<b>70.580</b>	<b>100%</b>

Fonte: ABVE, 2024.

Quando avaliadas as vendas de veículos pesados elétricos e híbridos, o volume é ainda menor. A JAC Motors, montadora chinesa que atualmente (em 2023) vende apenas veículos elétricos no país, faturou 234 caminhões elétricos em 2023, o que representa 0,22% do mercado total (RAMOS, 2024). Com base nesses números, é perceptível que outras medidas são necessárias para que a redução das emissões ocorra na velocidade desejada pelos governos. Nesse sentido, a adoção de combustíveis verdes em substituição a gasolina e ao diesel também surge como uma boa prática para esse objetivo. Na próxima seção serão exploradas iniciativas de adoção de combustíveis renováveis para redução das emissões.

#### 2.2.4.2. COMBUSTÍVEIS RENOVÁVEIS

Quando se trata de transportes, os combustíveis fósseis ainda representam a maior fonte energética disponível e utilizada no mundo. Os biocombustíveis, por sua vez, podem ser uma das fontes alternativas para atender à crescente demanda por energia do setor e, ao mesmo tempo, auxiliar na diminuição a poluição gerada no processo.

Nas últimas décadas, a fonte mais conhecida e explorada de biocombustíveis é a biomassa vegetal. Os biocombustíveis podem ser classificados em duas categorias: primários e secundários. Os primários são produzidos diretamente a partir de madeira, plantas, florestas, decomposição animal e resíduos de plantas. Já os secundários são gerados de micro-organismos (RODIONOVA *et al.*, 2017)

Apesar de não emitir uma quantidade significativa de CO<sub>2</sub> quando queimados, a produção dos biocombustíveis consome uma quantidade significativa de energia, demandam uma grande área de cultivo e envolvem outros aspectos poluidores que tornam a análise de sua sustentabilidade um tema de discussão (EDWARDS *et al.*, 2007; FARGIONE *et al.*, 2008; HILL *et al.*, 2006; MENICHETTI; OTTO, 2009; SEACHINGER *et al.*, 2008).

A produção de bioetanol, por exemplo, inclui processos de fermentação de cana-de-açúcar, milho ou outra matéria-prima à base de açúcares. O processo de destilação possui uma reação química (transesterificação) utilizando óleo vegetal como matéria-prima. A produção é feita em terras agrícolas e demanda coleta, transferências entre usinas e distribuição, todos processos que envolvem veículos que podem gerar emissões, pois em sua maioria são movidos a combustíveis fósseis. (HANAKI *et al.*, 2018).

Outro aspecto possui relação com a agricultura. Estudos apontam que gases de efeito estufa (GEEs) também são gerados durante o cultivo dessas culturas. Um desses GEEs, o óxido nitroso, é gerado quando os fertilizantes são usados para aumentar os rendimentos das culturas. Por fim, quando uma área florestal é desmatada para plantação de cana-de-açúcar para produção de etanol, o dióxido de carbono que a floresta absorvia deixa de ser retirado da atmosfera. (HANAKI *et al.*, 2018).

No estudo “O Efeito da Produção de Biocombustíveis nas Reduções de Emissão de Gases de Efeito Estufa” publicado em 2018 por Hanaki, onde analisou-se o cenário de produção de etanol a base de cana-de-açúcar, concluiu-se que:

“Os resultados sugerem que a produção de etanol efetivamente gera economias de GEE e Energia não-renovável (ENR), tanto na fase de produção quanto na de operação. Na etapa de produção, uma das principais vantagens é a recuperação dos subprodutos da cana-de-açúcar, palha e bagaço, seja para maximizar produção de etanol ou priorizar a geração de energia elétrica. Na fase de operação, o uso de etanol em veículos convencionais, dedicados a etanol ou de combustível flexível resulta em emissões insignificantes de GEE e consumo de ENR, uma vez que o etanol é admitido ser um combustível renovável neutro em carbono (HANAKI, 2018, p.244)”

O Brasil destaca-se no mundo quando o tema são combustíveis renováveis. Em relação ao transporte de passageiros, a iniciativa de produção de etanol no país possui grande destaque, bem como a venda de carros *flex* - capazes de utilizar tanto gasolina quanto etanol. Em 2014, a frota de veículos leves no Brasil foi estimada em 39,3 milhões de unidades, onde 54,5% eram *flex-fuel*, 34% movidos por gasolina, 10% a diesel e 1,5% eram híbridos ou elétricos (EPE, 2016).

A frota de veículos movidos a Gás Natural Veicular (GNV) também é relevante. Segundo dados de 2023 da Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGÁS), são cerca de 2,5 milhões de veículos adaptados ao combustível, o que representa a quarta maior frota mundial de veículos movidos com esse combustível. Apesar de fóssil, o GNV possui emissão de gás carbônico reduzido e praticamente nenhum componente particulado nem enxofre. Enquanto o gás possui emissão de CO<sup>2</sup> de 56 kg por Gigajoule (GJ), o diesel chega a 70 kg/GJ e a gasolina a 75 Kg/GJ.

Em relação ao transporte de cargas, o biodiesel participa 7% da composição dos combustíveis dos caminhões em rodagem no país (ANP, 2016). Pesquisas demonstram que a adição de um pequeno percentual desse biocombustível na mistura do diesel tradicional pode reduzir de forma significativa as emissões. A mistura de biodiesel de soja e gordura bovina foi analisada por Schirmer *et al.* (2015) e evidenciada como redutora de emissões.

Por outro lado, Bartholomeu *et al.* (2016) demonstra que a simples análise do nível de emissões do veículo não resulta em um ganho ambiental. Nesse trabalho, é observado uma perda de eficiência dos motores com uso de biocombustíveis na mistura do diesel, o que aumenta o consumo de biodiesel e resulta em níveis de emissão similares ou até maiores. Com isso, conclui-se que a inclusão de biodiesel sem a manutenção da eficiência dos motores existentes pode produzir um efeito contrário na questão ambiental, além de gerar perdas de eficiência para transportadores e para a economia de forma geral.

#### 2.2.4.3. CRÉDITOS DE CARBONO

Ao longo dos anos, diversos encontros internacionais entre países foram feitos visando combater as mudanças climáticas geradas pelo aquecimento do planeta, a exemplo da Eco-92, Rio+10 e a COP26. Nesses encontros foram debatidos termos que geraram tratados internacionais que estabeleceram cotas para a quantidade de GEE que as nações podem produzir a partir de suas respectivas dimensões. O Protocolo de Quioto, de 1997, criou o mercado de carbono, que entrou em vigor em 2005. As cotas atribuídas aos países foram então direcionadas as empresas desses países e desde então o mercado de créditos de carbono se estabeleceu (GUPTA, 2011).

O Brasil não dispõe de regulação formalmente aprovada referente ao mercado de carbono até o presente momento (dezembro/2023). Apesar disso, o país tem apresentado crescente geração de compensações de emissões no mercado voluntário. Estudo recente do Observatório da Bioeconomia, da Fundação Getúlio Vargas (FGV), demonstra que o Brasil tem



participado de forma relevante do mercado voluntário, tanto em volume de créditos gerados quanto em quantidade de projetos. Nos últimos anos, o volume de compensações geradas aumentou quase 20 vezes, como pode ser observado na Figura 22. O número de créditos emitidos passou de 2,2 milhões em 2018 para 45,2 milhões em 2021 (VARGAS *et al.*, 2022).

Figura 22 – Evolução do volume de créditos de carbono gerados no Brasil e no Mundo entre 2005 e 2021



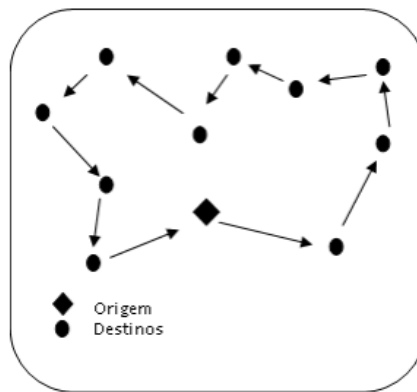
Fonte: Vargas, 2022

Assim como a eletrificação da frota e os combustíveis renováveis, o mercado de créditos de carbono dispõe de oportunidades para que sejam mitigadas as emissões de GEEs em todo o planeta. As três iniciativas se somam a outras iniciativas para redução de emissões como: a mudança da matriz energética, a redução do consumo de carne bovina, a reciclagem e consumo consciente, o reflorestamento, a captura de CO<sub>2</sub> da atmosfera, dentre outras. Além dessas, outra forma de reduzir as emissões de GEEs é a utilização de ferramentas de roteirização de cargas. No próximo capítulo, a roteirização será abordada de forma detalhada.

### 2.3. ROTEIRIZAÇÃO DE CARGAS

O Problema da Roteirização de Veículos (PRV) é originado do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Neste, existe a necessidade de se traçar uma rota, partindo de um ponto, passando por “n” locais e retornar ao local de origem. O objetivo é realizar o percurso com o menor trajeto possível (BALLOU, 2006).

Figura 23 – Representação de um roteiro do PCV



Fonte: Oliveira, 2014.

Diferentemente do PCV, o PRV considera restrições que tornam o problema mais complexo. O PRV aborda casos reais e busca não só minimizar a distância total do trajeto, como também respeitar as restrições incluídas na elaboração dos cenários e atender a requisitos distintos impostos pela logística de operação do transporte rodoviário (BALLOU, 2006).

Os benefícios observados pela utilização da roteirização nas operações logísticas são analisados de forma recorrente na literatura. Comparações de cenários de antes e depois do uso da roteirização, testes de aplicação em diferentes operações logísticas e proposição de novos métodos de otimização das rotas são os principais temas discutidos.

Usar um método de roteirização pode aumentar o lucro de uma empresa de transporte devido a diminuição dos custos operacionais e melhora no nível de serviço obtidos através dele, oferecendo ao cliente mais qualidade e contentamento (RAVAGNOLLI, 2006).

Segundo Lucena *et al.* (2020), a utilização de método de roteirização pode trazer dez diferentes benefícios a operação logística:

1. Antecipação de rotas com alto tráfego;
2. Conservação do veículo através da seleção de rotas de maior qualidade;
3. Maior segurança através da seleção de rotas com menor incidência de sinistro;
4. Tempo otimizado através da seleção de rotas com vias rápidas e com menor incidência de engarrafamentos;
5. Aproveitamento dos recursos com melhor alocação das mercadorias as respectivas capacidades dos veículos;
6. Segurança para os motoristas com o planejamento de janelas de descarga planejadas e rotas seguras;
7. Redução de consumo de combustível pela menor quilometragem das rotas;

8. Economia na manutenção de veículos;
9. Aumento da produtividade pela otimização dos roteiros de entrega e coleta;
10. Clientes mais satisfeitos com atendimento mais preciso aos prazos de entrega.

Além dos pontos mencionados, a roteirização pode também trazer benefícios ambientais com a redução de emissões de gases poluentes. A adoção de rotas inteligentes, veículos menos poluentes e combustíveis ecológicos podem reduzir o impacto ambiental e melhorar a imagem das empresas vinculadas a esses transportes.

Na próxima seção será feita uma retrospectiva histórica do estudo da roteirização. Na sequência, serão abordados os temas atuais de pesquisa vinculados ao assunto e por fim será iniciada a discussão sobre a roteirização verde.

### 2.3.1. HISTÓRICO

Os primeiros estudos relacionados a roteirização e otimização de percursos datam de meados da década de 1950. Segundo Scholar (2019), o problema da roteirização de veículos (PRV) – do inglês *Vehicle routing problem* (VRP) - vem sendo estudado desde 1959 com o desenvolvimento de soluções para o VRP determinístico clássico, onde veículos de entrega precisam realizar entregas a um determinado grupo de compradores dispersos, executando o trajeto da forma mais econômica.

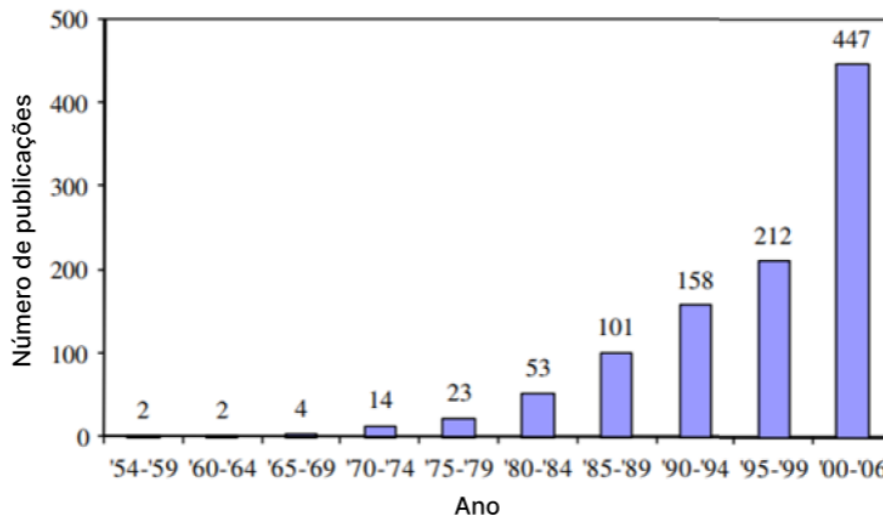
Eksioglu (2019) aponta que o artigo de Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954) foi o primeiro registro na literatura do PRV. Nele, estudou-se o problema do caixeiro viajante (PCV) do inglês *travelling salesman problem* (TSP), e se propôs um método de solução. Clarke e Wright (1964) incorporaram pela primeira vez mais de um veículo na formulação do problema, o que pode ser considerado o primeiro estudo sobre o problema do PRV.

Ainda de acordo com Eksioglu (2019), o primeiro artigo que menciona o termo “*vehicle routing*” em seu título é atribuído para Golden, Magnanti e Nguyan (1972). Outras versões do PRV surgiram nos anos 1970, como: roteirização de frotas, desenho de rede de transporte, gestão de distribuição, coleta de resíduos, dentre outros. Em 1983, Solomon adicionou restrições referentes a janelas de recebimento, ao problema do PRV, dando início ao que ficou conhecido como “*Solomon Instances*”.

Com o desenvolvimento da microcomputação e do aumento da acessibilidade a essa tecnologia de forma descentralizada, foi observado um aumento exponencial em pesquisa e trabalhos científicos publicados nos anos 1990 e 2000. O gráfico da Figura 24 demonstra esse

comportamento com um quantitativo do número de estudos publicados a respeito do PRV entre 1954 e 2006 (EKSIIOGLU, 2019).

Figura 24 – Número de artigos publicados sobre PRV entre 1954 e 2006



Fonte: Eksioğlu, 2019.

Ao longo do período apresentado na Figura 24, diversos aspectos e métodos de roteirização foram abordados e formaram o estado da arte da roteirização. Nesse contexto, diversas formas de dividir o estudo surgiram, com métodos exatos, heurísticos e meta-heurísticos sendo desenvolvidos e aplicados aos mais variados cenários. Na próxima seção, serão apresentados os diferentes tipos de roteirização existentes, de acordo com o descrito na literatura.

### 2.3.2. TIPOS DE ROTEIRIZAÇÃO

A bibliografia divide os tipos de roteirização de duas maneiras: (1) de forma macro, separando os diferentes métodos de acordo com uma classificação teórica em função do tipo de resolução adotada (relacionada a exatidão ou não do resultado do método) e (2) de forma micro, onde cada método é identificado de forma particular, com um nome e proposição específica.

Góes (2005) afirma que a roteirização pode ser classificada em métodos exatos e métodos aproximados. Os métodos exatos são aqueles que, considerando todas as possíveis restrições e particularidades do caso, buscam a melhor solução alcançável. Os métodos aproximados, conhecidos como métodos heurísticos, são métodos que buscam a melhor solução aproximada para um problema complexo.

Devido ao grande número de variáveis e restrições que por vezes tornam inviável o tratamento do problema através de um método exato, o método heurístico tende a ser o caminho

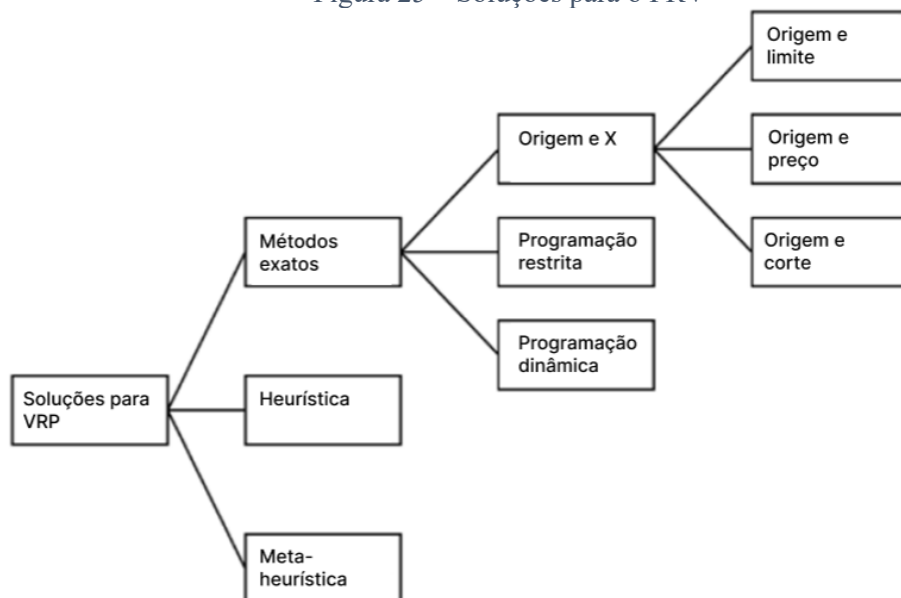
ideal. Assim, um método aproximado ou heurístico tem por objetivo encontrar uma solução que seja próxima da solução ótima, tendo em vista que encontrar a solução ótima é inviável.

Considerando a heurística, a busca por uma solução não exata para um cenário específico, essa pode ainda ser ampliada através da elaboração de uma meta-heurística. A meta-heurística se caracteriza pela combinação de várias heurísticas na solução de um determinado problema (GOÉS, 2005). Assim, é possível categorizar o estudo dos métodos de roteirização em três grandes grupos: exatos, heurísticos e meta-heurísticos.

Konstantakopoulos *et al.* (2022) separam o estudo da roteirização de forma similar a Goés (2005), dividindo a literatura nos três grupos anteriormente citados. Em seu trabalho, os autores comentam que métodos exatos são tipicamente aplicados a problemas de pequena escala (até 200 clientes). A Figura 25 apresenta um esquema proposto pelos autores para classificar os PRV.

No esquema proposto pelo autor, as soluções para o PRV são divididas inicialmente em 3 caminhos: método exato, heurístico e meta-heurístico. Os métodos exatos dividem-se em 3 tipos: origem e “x” – onde o “x” pode ser limite, preço ou corte, programação com restrição e programação dinâmica.

Figura 25 – Soluções para o PRV



Fonte: Konstantakopoulos et al., 2022.

Segundo Konstantakopoulos *et al.* (2022), algoritmos heurísticos e meta-heurísticos atualmente se destacam como principais métodos de resolução dos PRVs. Apesar disso, com o aumento no poder de processamento e memória dos computadores, a utilização dos métodos exatos deve crescer ao longo dos próximos anos. É também apontado que além dos tradicionais

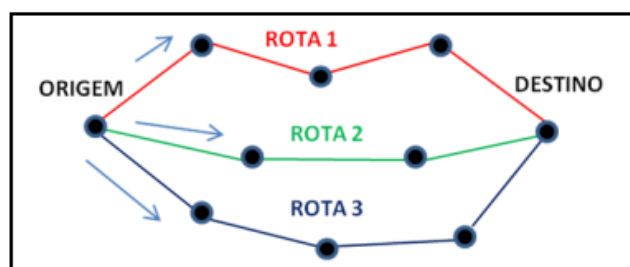
objetivos de custo de viagem, distância total e janelas de tempo, recentemente a redução de CO<sub>2</sub> tem sido foco dos estudos sobre roteirização, juntamente com a busca pela otimização de múltiplos critérios.

Oliveira (2014) por sua vez aborda os diferentes métodos de roteirização existentes de forma individual, dividindo-os em seis tipos específicos de acordo com a revisão bibliográfica feita em seu trabalho. Esses seis tipos são:

- **Método do caminho mais curto:** também conhecido método do vizinho mais próximo, a técnica busca o melhor caminho que minimize a distância total. Primeiro, desloca-se para o ponto mais próximo da origem. Após, o ponto de partida é excluído dos possíveis destinos e desloca-se novamente ao ponto mais próximo. O processo é repetido até o destino (OLIVEIRA, 2014).

Dentre os algoritmos aplicados para esse método, destaca-se o algoritmo de Dijkstra, que calcula a rota mais eficiente em termos de distância, tempo ou outros critérios relevantes (ALVARENGA, 2020). Ao considerar variáveis como restrições de veículos, limitações de peso e condições de tráfego, o método do caminho mais curto proporciona uma abordagem holística para a tomada de decisões na roteirização de carga, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade das operações. O desenho abaixo é apresentado por Oliveira (2014) como forma de exemplificar a ideia do método.

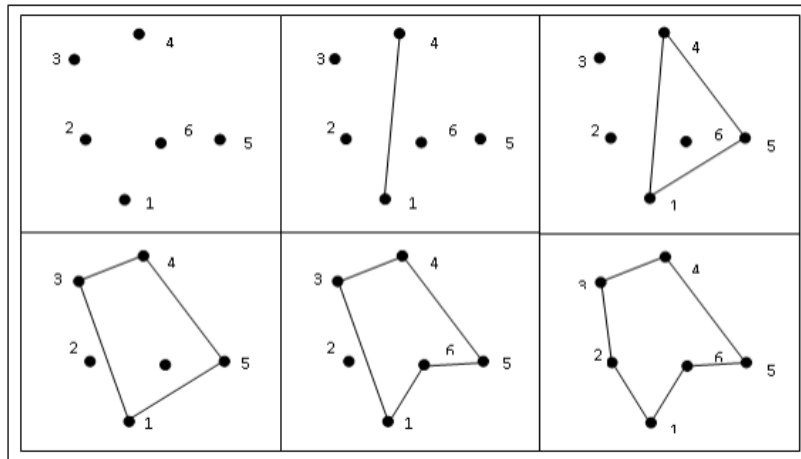
Figura 26 – Método do caminho mais curto



Fonte: Oliveira, 2014.

- **Método do ponto mais distante:** é selecionado um ponto inicial qualquer e esse é ligado ao seu ponto mais distante. Essa linha será a base do problema. Na sequência, deverá ser adicionada a essa linha o ponto mais distante a ela, formando assim uma figura geométrica. Esse processo deve ser repetido até todos os pontos estarem conectados. Esse desenho formará o trajeto (NOVAES, 2007).

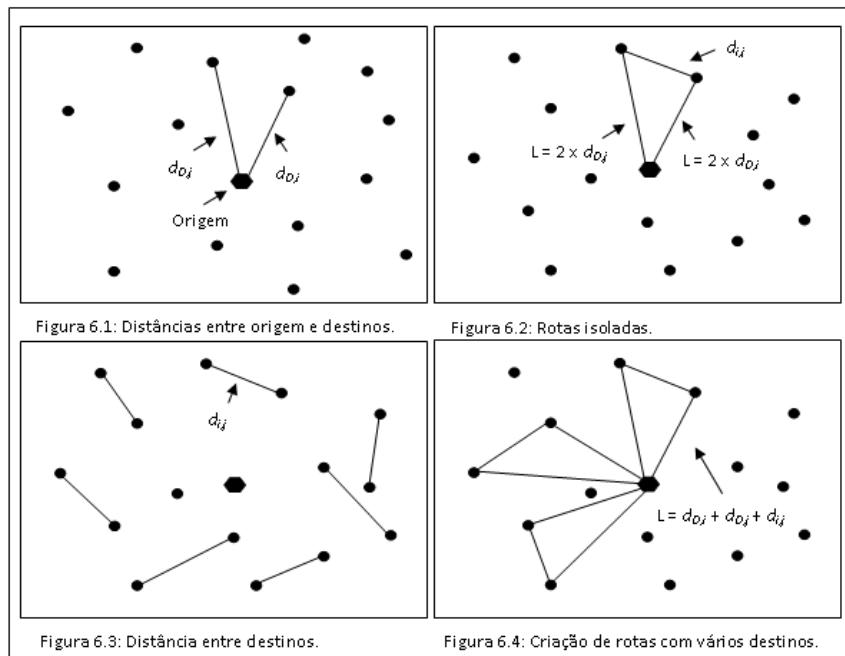
Figura 27 – Método do ponto mais distante



Fonte: Novaes, 2007.

- Método Clarke e Wright:** trata-se de um método heurístico que gera rotas próximas das ideais, respeitando as restrições de tempo e capacidade estabelecidas. O processo consiste na criação de rotas isoladas que devem respeitar as restrições de janela de tempo estabelecidas na formulação do problema (MIURA, 2008).

Figura 28 – Método Clarke e Wright



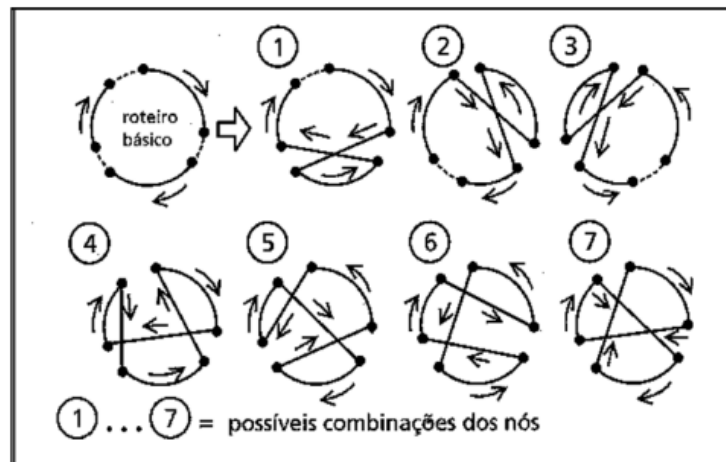
Fonte: Miura, 2008

- Método Simplex:** o método SIMPLEX, embora inicialmente desenvolvido para resolver problemas de programação linear, pode ser adaptado para ser utilizado na roteirização de cargas, especialmente em situações mais complexas que envolvem múltiplos destinos,

restrições específicas e variáveis interdependentes. Ao formular o problema de roteirização como um modelo matemático, é possível expressar as restrições logísticas, como capacidade dos veículos, restrições de tempo e preferências de clientes, como um sistema de equações lineares utilizando matrizes matemáticas que resultarão em uma solução exata após o processo iterativo de busca de soluções (DANTZIG, 1950; MEDEIROS *et al.*, 1998).

- **Métodos de melhoria de roteiro:** também conhecidos como métodos *k-opt* (*optimal* do inglês “ótimo”) buscam reduzir a distância dos trajetos através da substituição dos arcos origem-destino. Após as substituições, o deslocamento total é recalculado e caso haja diminuição da distância total, a nova solução é mantida. Caso não haja diminuição, é mantida a formatação anterior e feita uma alternativa de substituição. Uma vez que não seja encontrada uma alteração que traga redução na distância, é finalizada a otimização (NOVAES, 2007).

Figura 29 – Método de melhoria de roteiro



Fonte: Novaes, 2007.

- **Algoritmo do transporte ou Problema do transporte:** no cenário em que a roteirização pode possuir diversas origens e diversos destinos, pode-se aplicar o método chamado algoritmo do transporte (BALLOU, 2006). Trata-se de um método que busca uma solução ótima através de técnicas de otimização de pesquisa operacional.

Junior (2021), em seu trabalho, elenca os tipos de roteirização dividindo-os em roteirização “pura” e roteirização “combinada com programação”. Os principais problemas de



roteirização pura são elencados na Quadro 1, onde as condicionantes de tempo não são levadas em consideração no momento da resolução do problema.

Quadro 1 – Classificação dos problemas de roteirização pura

<i>Denominação</i>	<i>número de roteiros</i>	<i>localização dos clientes</i>	<i>limite de capacidade nos veículos</i>	<i>número de bases</i>	<i>demandas</i>
Problema do caixeiro viajante	um	nós	não	uma	determinísticas
Problema do carteiro chinês	um	arcos	não	uma	determinísticas
Problema de múltiplos caixeiros viajantes	múltiplos	nós	não	uma	determinísticas
Problema de roteirização em nós com uma única base	múltiplos	nós	sim	uma	determinísticas
Problema de roteirização em nós com múltiplas bases	Múltiplos	nós	sim	múltiplas	determinísticas
Problema de roteirização em nós com demandas incertas	Múltiplos	nós	sim	uma	estocásticas
Problema de roteirização em arcos com limite de capacidade	Múltiplos	arcos	sim	uma	determinísticas

Fonte: Junior, 2011.

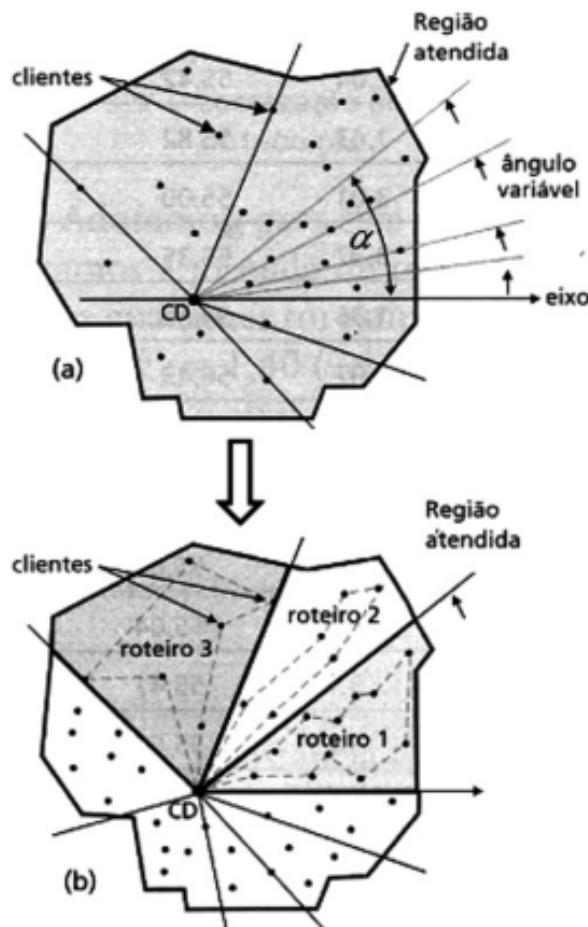
Os problemas supracitados derivam do problema clássico do caixeiro viajante, à exceção do problema do carteiro chinês.

Pinheiro *et al.* (2016) fazem referência a outros dois métodos de roteirização para analisar a melhor forma de roteirização cargas fracionadas em um determinado centro urbano. O método da varredura é abordado como um método de fácil e rápida utilização, porém com uma margem de 10% de erro em relação a solução ótima. Ou seja, trata-se de um método heurístico que objetiva a otimização da rota. O passo a passo simplificado para execução do método da varredura é descrito abaixo:

- A. Definir um eixo horizontal que traspasse o CD;
- B. Girar o eixo em torno do CD no sentido anti-horário até o primeiro cliente;
- C. Teste do cliente:

- a. Tempo de atendimento do cliente atende a janela de tempo?
  - b. Quantidade de mercadoria excede o limite de capacidade do veículo?
  - D. Caso alguma restrição não seja atendida o roteiro está encerrado. Nesse caso, fechamos o roteiro e iniciamos um novo. Caso não, repete-se os passos B e C.
- O processo termina quando todos os clientes tiverem sido incluídos em um roteiro;
- E. Para cada rota, deve-se aplicar um método de melhoria visando otimizar o percurso.

Figura 30 – Método da Varredura.



Fonte: Pinheiro *et al.*, (2016)

O outro método abordado por Pinheiro *et al.* (2016) é o método Clark e Wright. Também conhecido como Algoritmo econômico – do inglês *Savings Algorithm* – é caracterizado por encontrar soluções mais próximas da exata do que o método da varredura. A forma de funcionamento já foi apresentada anteriormente no escopo do trabalho de Oliveira (2014) e, portanto, não será repetido.

Por fim, Shi-Yi Tan e Wei-Chang Yeh (2021) apresentam outro tipo de classificação dos métodos, separando-os em dois grupos combinatórios: pelo número de possíveis soluções

(1), que cresce de forma exponencial com a computação, e pelo número de variáveis do problema (2), que também pode crescer de acordo com os atributos do problema. Dentro desses grupos, existem variantes do estudo clássico de PRV que são: PRV capacitado, PRV com frotas heterogêneas, PRV com dependência de tempo, PRV multi-depósito, dentre outras.

As referências elencadas na presente seção demonstram que o tema da roteirização apresenta diferentes formas de abordagem, assim como diversos métodos de resolução. Com o avanço da tecnologia permitindo maior acesso aos computadores e produzindo um aumento na capacidade de processamento desses, o desenvolvimento e aprimoramento dos métodos de roteirização é notório, o que se reflete também no aumento da produção científica a respeito do tema observado nos últimos anos. Na próxima seção serão elencados os benefícios que a roteirização traz a prática logística e que justificam o nível de desenvolvimento observado na área nos anos recentes.

Conforme apontado acima, além da usual necessidade de diminuição dos custos através da otimização das rotas, a questão ambiental começou a ser considerada nos estudos da roteirização nos últimos anos. Nesse sentido, na próxima seção a roteirização verde será abordada em detalhes, bem como seus diferentes tipos e características.

### 2.3.3. ROTEIRIZAÇÃO VERDE

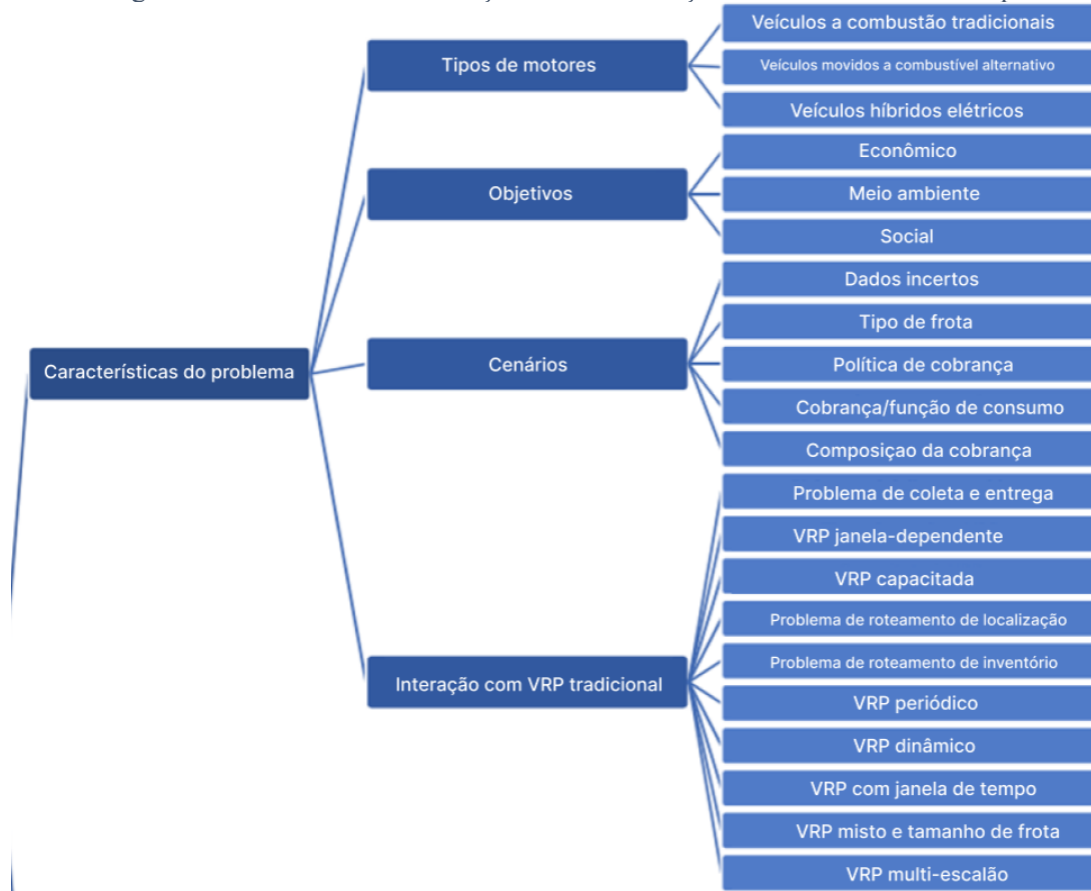
A inclusão de novos objetivos e restrições ao estudo da roteirização, referentes aos problemas relacionados a sustentabilidade ambiental, geraram novos modelos de resolução do problema da roteirização com maiores níveis de complexidade. A logística verde objetiva a redução do consumo de energia, aumento da reutilização e otimização de resíduos. Nesse sentido, a roteirização verde objetiva a implementação de rotas que atendam aos objetivos ambientais e financeiros das empresas (LIN *et al.*, 2013).

Asghari e Al-e-hashem (2021) uma revisão conceitual e dos estudos publicados nos últimos anos a respeito do tema. Nesse, o autor propõe duas possíveis classificações para a roteirização verde. A primeira divisão é feita em função das problemáticas envolvidas no problema. Nessa divisão, tem-se 4 agrupamentos:

- 1) Tipos de motores dos veículos;
- 2) Objetivos;
- 3) Cenários;
- 4) Interação com os métodos tradicionais de roteirização.

A Figura 31, apresenta o *framework* com as 4 divisões e suas respectivas classificações finais.

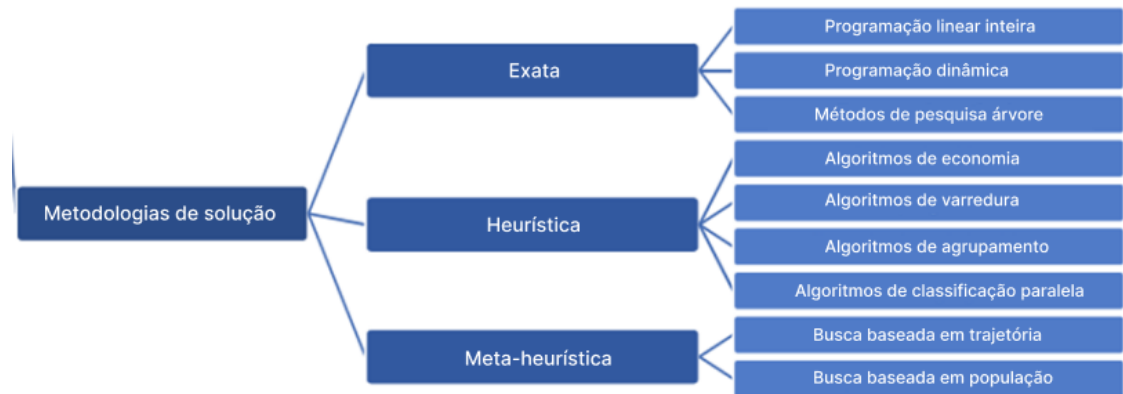
Figura 31 – Divisão da roteirização verde em função das características dos problemas



Fonte: Asghari; Al-e-hashem, 2021.

No total, são 21 classificações elencadas com base nas problemáticas que envolvem o tema. Esse número expõe a complexidade do assunto. A segunda classificação elaborada por Asghari e Al-e-hashem (2021) é baseada nos métodos de resolução do problema. Os três métodos elencados já foram tratados no presente trabalho em capítulos anteriores e são os métodos: (1) exatos, (2) heurísticos e (3) meta-heurísticos (Figura 32).

Figura 32 – Divisão da roteirização verde em função dos métodos de resolução



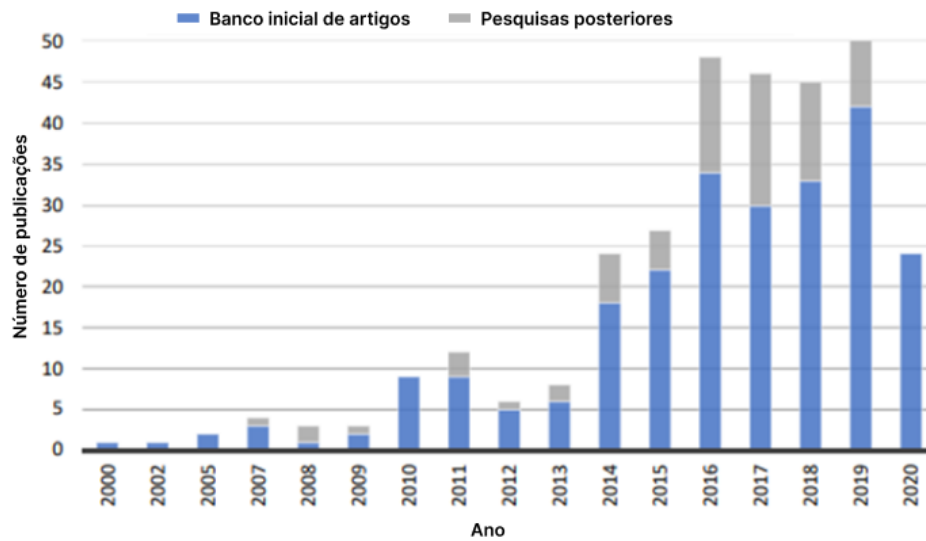
Fonte: Asghari; Al-e-hashem, 2021.

Os três caminhos para resolução do problema apontam para 9 possíveis escolhas de soluções. Ainda segundo Asghari e Al-e-hashem (2021), na revisão sistemática executada para a construção do trabalho foram referenciadas 7 diferentes abordagens para o problema da roteirização verde, os quais são listados abaixo:

1. VCA - Veículo com combustível alternativo (do inglês AFV: *alternative-fuel powered vehicle*);
2. VE - Veículo elétrico (do inglês EV: *Electric vehicle*);
3. VEH – Veículo elétrico híbrido (do inglês HEV: *Hybrid electric vehicle*);
4. VCI – Veículo de combustão interna (do inglês ICEV: *Internal combustion engine Vehicle*);
5. VEHP – Veículo elétrico híbrido plug-in (do inglês PHEV: *Plug-in hybrid electric Vehicle*);
6. PRP – Problema do roteamento da poluição (do inglês PRP: *Pollution-routing problem*);
7. LR – Logística reversa (do inglês RL: *Reverse Logistics*).

Essas sete diferentes abordagens foram encontradas nas 313 publicações levantadas por Asghari e Al-e-hashem (2021), em sua revisão bibliográfica. O gráfico da Figura 33 separa os trabalhos por data de publicação e evidencia uma clara tendência de crescimento nos anos recentes.

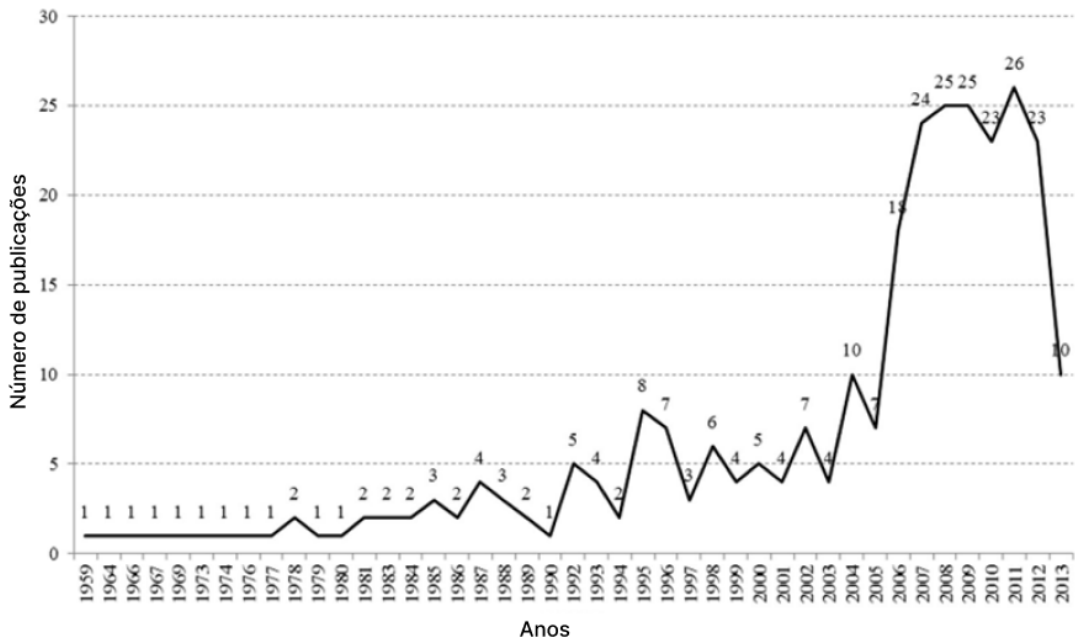
Figura 33 – Estudos no contexto da Roteirização Verde, 2021.



Fonte: Asghari; Al-e-hashem, 2021.

Lin *et al.* (2013) apresentam uma revisão dos trabalhos publicados até então sobre roteirização verde e indicam quais as tendências futuras relacionadas ao assunto. Além de elencar quase 300 trabalhos, os autores abordam outro tipo de classificação para a roteirização verde. O gráfico da Figura 34 apresenta a quantidade de estudos elencados por ano de publicação (Figura 35).

Figura 34 – Distribuição de artigos por ano

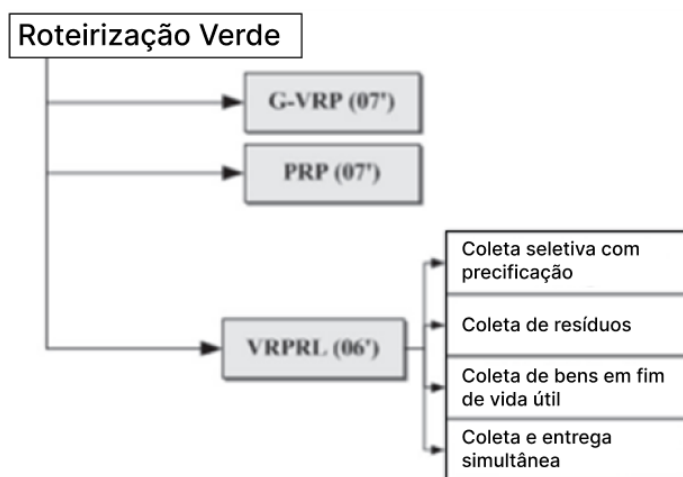


Fonte: Lin *et al.*, 2013.

Através de uma análise inicial sobre o tema ampliado da roteirização, os autores classificam os trabalhos relacionados a roteirização verde em três grupos:

- 1) Roteirização de veículos verdes (do inglês GVRP – *Green Vehicle routing problem*);
- 2) Problema da roteirização e poluição (do inglês PRP – *Polution Routing Problem*);
- 3) Problema da roteirização de logística reversa (do inglês VRPRL – *Vehicle Routing Problem – Reverse Logistics*).

Figura 35 – Classificação da roteirização verde



Fonte: Lin *et al.*, 2013.

O primeiro grupo proposto no organograma acima, o G-VRP – Roteirização de veículos verdes – avalia a otimização do consumo de energia no meio do transporte. O consumo de combustível é um tema recorrente nas pesquisas sobre o G-VRP. De acordo com um relatório do Departamento de Energia dos Estados Unidos (2008), a velocidade da viagem, o peso da carga e a distância da viagem são os fatores que impactam no consumo de combustível dos veículos e devem ser levados em consideração nesse estudo (LIN *et al.*, 2013).

Em termos de consumo de energia, uma tendência que deve ser explorada nos próximos anos é a introdução de veículos que utilizam combustíveis alternativos no problema da roteirização de veículos verdes. Com a introdução de caminhões híbridos e elétricos nas frotas de transportadores, outros critérios como distância limite de autonomia, estações de recarga e rotas exclusivas serão adicionados aos critérios e devem criar bases para novos estudos nessa área (LIN *et al.*, 2013).

As preocupações com os níveis de emissões de gases poluentes são abordadas no PRP – Problema da roteirização e poluição. Além da busca pela redução da distância das rotas, são levados em consideração fundamentalmente: a distância percorrida com os motores frios, congestionamentos, combustíveis ecológicos, operação de retorno de carga (*backhauling*), dentre outros similares (LIN *et al.*, 2013).

Bektas e Laporte (2011) apontam que a análise em tempo real do tráfego pode trazer um grande impacto na redução da poluição gerada pelos veículos. A verificação em tempo real das condições do tráfego permite o direcionamento dos veículos a rotas menos congestionadas, levando a menores níveis de emissões uma vez que maior velocidade implica em menores níveis de emissão, mesmo quando a adequação do trajeto impacta em uma rota maior.

Bauer, Bektas e Crainic (2010) discorrem sobre como a intermodalidade dos modos de transporte pode reduzir a emissão de gases. Fagerholt, Laporte e Norstad (2010) demonstram como a otimização da velocidade dos veículos em determinadas rotas podem impactar na redução do consumo de combustível e, por conseguinte, diminuir o impacto na poluição desses veículos.

Por fim, o terceiro grupo proposto por Lin *et al.* (2013) no organograma refere-se a logística reversa. A roteirização para logística reversa é um tema recorrente nos estudos ligados a roteirização clássica a bastante tempo. O processo logístico de retorno de cargas está presente em diversos cenários operacionais e em diversos tipos de carga. Esse pode ser executado de duas formas: (1) ao longo das entregas, onde em cada ponto de entrega o veículo recebe embalagens/vasilhas de mercadorias vazias para retorno, processo conhecido na literatura como “*milk run*”; ou (2) após a viagem de ida ser concluída, como na chamada operação “*backhauling*”.

Grande parte dos estudos da roteirização de logística reversa avalia a reciclagem de resíduos para posterior reprocessamento em depósitos determinados. Nesse sentido, Lin *et al.* (2013) subdivide o problema em quatro categorias: (1) coleta seletiva com precificação; (2) coleta e distribuição simultânea; (3) coleta de bens em final de vida e (4) coleta de resíduos.

A coleta seletiva com precificação é analisada quando se busca avaliar a viabilidade econômica de se realizar ou não uma coleta durante um processo logístico de distribuição. Assim sendo, se assemelha ao problema da coleta e distribuição simultânea. Privé *et al.* (2006) avaliaram a viabilidade da coleta de garrafas vazias durante um processo de entrega de refrigerantes, onde cada entrega é obrigatória, porém as coletas não.

Essa escolha era feita em função da capacidade disponível no veículo para coleta em cada ponto. Foram utilizadas frotas heterogêneas, diferentes tipos de produtos e janelas de tempo e o objetivo da roteirização era minimizar os custos da rota e maximizar o lucro com as coletas. Alshamrani, Mathur e Ballou (2007) avaliaram o problema de entregas e coletas simultâneas de recipientes de sangue, onde uma penalidade de custo era inserida no problema quando a coleta não era feita, apesar da economia no trajeto.

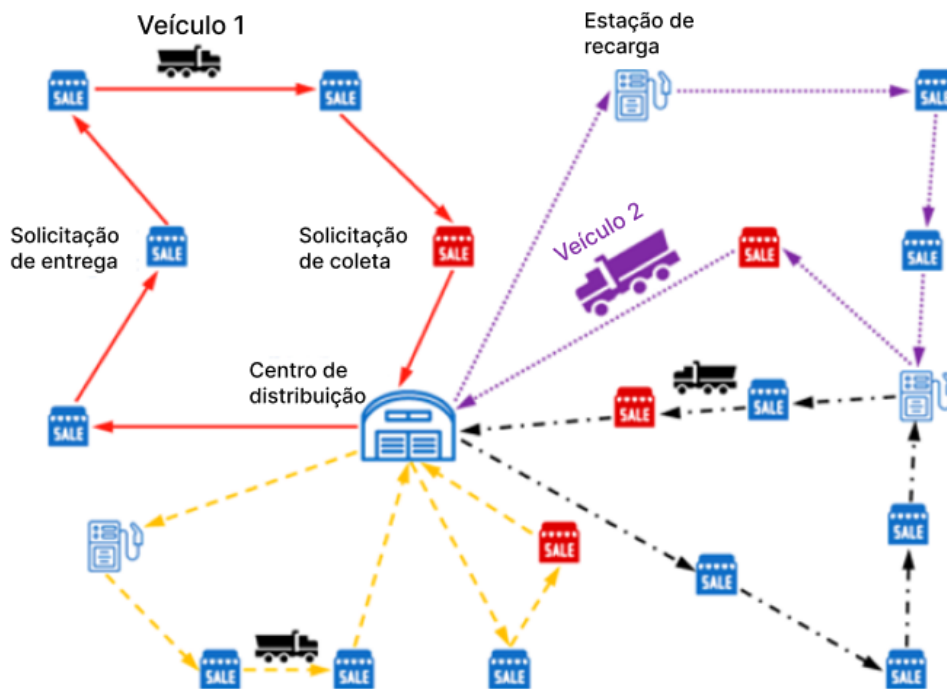


A coleta de resíduos e bens em fim de vida útil representam tipos de roteirização que possuem impacto direto na proteção ambiental. Estudos nessa seara da roteirização foram desenvolvidos por Beltrami e Bodin (1974), Sculli *et al.* (1987) e Mansini e Speranza (1998), objetivando a geração de rotas eficientes que reduzam os resíduos, aumentem o reuso e reciclagem dos produtos.

Em outro trabalho que aborda a roteirização verde, porém no cenário chinês de infraestrutura, Zhao e Lu (2019) analisam a introdução dos veículos elétricos nos estudos da roteirização para uma companhia de logística na cidade de Wuhan, China. Nesse problema, uma frota heterogênea de veículos elétricos sai de um centro de distribuição, faz a distribuição e coleta de mercadorias seguindo janelas de tempo pré-definidas e retorna ao ponto inicial.

Durante o processo, os veículos podem retornar até o centro de distribuição para carregar mais mercadorias ou descarregar coletas realizadas, podem ir a estações de recarga ou carregar no próprio centro de distribuição. O objetivo é minimizar os custos de viagem, recarga e espera dos clientes. No esquema abaixo, são demonstradas as diversas combinação de rotas que os veículos podem tomar (ZHAO; LU, 2019).

Figura 36 – Ilustração do problema proposto por Zhao e Lu



Fonte: Zhao e Lu, 2019.

O trabalho ilustrado na Figura 36 explora de forma combinada diversos problemas de roteirização, como: roteirização com janela de tempo, roteirização com frota heterogênea,

roteirização de veículos verdes com estações de recarga e roteirização de múltiplas rotas. Assim sendo, para a resolução do problema, optou-se por uma abordagem meta-heurística, ou seja, a combinação de diversas heurísticas (ZHAO; LU, 2019). No método proposto, uma heurística de construção de rota sequencial é implementada. A cada iteração, as rotas criadas com os diferentes tipos de veículos são independentes.

Para a construção de uma rota referente a um tipo de veículo, o cliente com o menor aumento de custo é adicionado à rota parcial enquanto satisfaz todas as restrições. Se um cliente adicionado a rota viola a capacidade da bateria (ou limitação de autonomia), o algoritmo tenta inserir uma estação de carregamento mais próxima do cliente. O processo de inserção continua até que nenhum outro cliente possa ser adicionado à rota. O tipo de veículo com o menor custo é selecionado.

Os clientes na rota correspondente são removidos do conjunto de clientes não atribuídos e a próxima iteração é executada até que nenhum cliente não atribuído esteja disponível. O algoritmo proposto foi comparado ao atual algoritmo utilizado pela empresa e, através dos testes produzidos com auxílio de ferramentas computacionais, mostrou-se mais eficiente.

Durante a revisão bibliográfica não foram encontrados estudos brasileiros a respeito da aplicação de conceitos e métodos de roteirização verde no contexto brasileiro da logística e transporte. Nesse sentido, faz-se importante a avaliação das metodologias propostas na bibliografia internacional ao cenário brasileiro, tendo em vista as variáveis locais envolvidas nos métodos abordados.

### 3. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Durante a construção da fundamentação teórica do trabalho foram pesquisados, explorados e descritos conceitos relacionados ao tema central da dissertação: a roteirização verde. Nas três seções construídas, foram apresentados dados sobre o setor de transportes (2.1), meio ambiente (2.2) e a roteirização de cargas (2.3), de modo a construir uma base teórica a respeito do tema. Com isso, foi possível a construção de uma compreensão do problema a ser estudado.

No capítulo atual, será feita uma revisão sistemática a respeito da roteirização verde. Será utilizada, de forma adaptada, uma metodologia chamada *Knowledge Development Process - Constructivist* (PROKNOW-C), proposta por Ensslin *et al.* (2010d, apud AFONSO *et al.*, 2012). A metodologia prevê que a revisão sistemática da literatura deve seguir os 10 passos abaixo elencados:

- a. Definição dos eixos de pesquisa;
- b. Seleção de palavras-chave para realizar a busca;
- c. Definição das bases de dados e testes de aderência das palavras-chave;
- d. Pesquisa e armazenamento de artigos em banco de dados bruto;
- e. Remoção de artigos repetidos e descarte dos não relacionados ao tema de pesquisa;
- f. Análise da relevância científica dos trabalhos selecionados;
  - Busca de quantidade de citações e definição de ponto de corte.
  - Leitura dos resumos para eliminar os artigos não alinhados.
  - Criação de banco de autores.
- g. Verificação da relevância dos artigos não classificados anteriormente;
- h. Leitura dos resumos dos artigos com relevância confirmada;
- i. Consolidação dos artigos considerados relevantes;
- j. Consulta dos artigos integrais disponíveis e descarte dos não disponíveis.

Os 10 passos acima serão sintetizados em 6 seções a seguir.

#### 3.1. DEFINIÇÃO DOS EIXOS DE PESQUISA E SELEÇÃO DAS PALAVRAS-CHAVE

Os eixos de pesquisa são uma forma de categorizar e priorizar as áreas de interesse em uma pesquisa. A seleção das palavras-chave é importante para direcionar a pesquisa e garantir que ela se concentre nos tópicos relevantes. No processo de revisão sistemática realizado, as palavras-chave escolhidas foram “roteirização verde”. O termo foi pesquisado primeiramente

em português e, de forma complementar, em inglês (*Green routing problem*) e espanhol (*Ruteo verde*).

A seleção das palavras-chave foi baseada na ampla pesquisa bibliográfica realizada para a construção da base teórica do trabalho que foi exposta no capítulo 2. Durante esse processo, menos rigoroso que a revisão sistemática e com viés de confirmação por parte do autor, foi possível obter uma visão geral do estado da arte do tema e direcionar a escolha dos termos-chave para a pesquisa.

### 3.2. SELEÇÃO DAS BASES DE DADOS

O critério para determinação das bases selecionadas foram a relevância dos repositórios, o volume de trabalhos encontrados e a diversificação de origem das bases. Dessa forma, foi possível realizar uma busca abrangente das bibliografias existentes. As quatro bases são:

- Scopus;
- Science Direct;
- Web of Science;
- Scielo.

Em todas as bases foram feitas pesquisas pelas palavras-chave tanto na língua inglesa, quanto na língua portuguesa e espanhola. Todas as bases foram acessadas através da rede privada virtual (*Virtual Private Network – VPN*) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

### 3.3. ARMAZENAGEM E PROCESSO DE FILTRAGEM INICIAL

A pesquisa inicial pelo termo "roteirização verde" em português, inglês (*green routing problem*) e espanhol (*ruteamento verde*) nas fontes escolhidas resultou em uma base de 3.160 bibliografias, divididas em cada uma das 4 fontes conforme mostra o Quadro 2.

Nessa busca inicial, foram consultados trabalhos que continham a palavra-chave no título OU no resumo OU nas palavras-chave do autor.

Quadro 2 – Banco de dados inicial

<b>Base de dados</b>	<b>Resultado</b>
ScienceDirect	504
ScieLO	8
Focus	1.092
Web of Science	1.556
<b>Total</b>	<b>3.160</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

O primeiro processo de filtragem foi o de remoção das referências repetidas, o qual foi realizado através do manuseio de planilhas de Excel. Esse filtro retirou 1.040 trabalhos encontrados de forma duplicada nas 4 bases coletadas. Com isso, restaram 2.120 bibliografias.

Quadro 3 – Revisão das bibliografias duplicadas

<b>Revisão de repetidos</b>	
Base inicial	3.160
Repetidos	1.040
<b>Restantes</b>	<b>2.120</b>

Fonte: elaborado pelo autor (2023).

Com a retirada dos trabalhos repetidos, foi então feita a análise de aderência do título dos trabalhos. Nessa etapa, foram removidos trabalhos cujos títulos não apresentavam aderência ao tema da roteirização verde. Dois exemplos de trabalhos que exemplificam esse filtro podem ser observados a seguir:

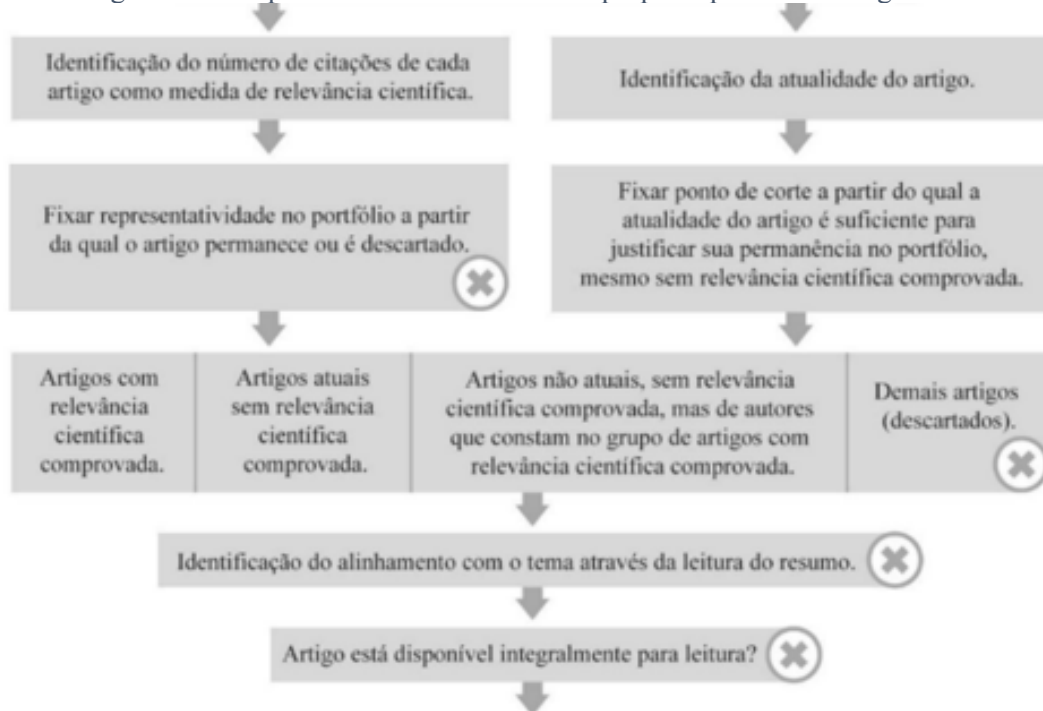
- *An efficient MIP model for locomotive scheduling with time windows* – Modelo eficiente MIP para agendamento de locomotivas com janelas de tempo -. Removido porque o trabalho aborda o transporte ferroviário.
- *Design of plasmonic directional antennas via evolutionary optimization* – Projeto de antenas direcionais plasmônicas via otimização evolutiva - Removido porque aborda a alocação de antenas.

Após essas duas etapas, restaram 265 trabalhos para verificação dos próximos passos. A partir dessa base, serão conduzidos os próximos passos de avaliação de relevância e disponibilidade dos trabalhos para a construção da base final de análise da revisão sistemática.

### 3.4. VERIFICAÇÃO DA RELEVÂNCIA CIENTÍFICA E DISPONIBILIDADE

Para a verificação da relevância dos trabalhos científicos selecionados foram seguidos os passos propostos pela metodologia adotada, conforme recorte do fluxo exibido a seguir:

Figura 37 – Etapas da análise de relevância proposta pela metodologia PROKNOW



Fonte: Ensslin et al. (2010d) apud Afonso et al. (2012)

A análise da quantidade de citações encontradas para cada bibliografia foi realizada através da ferramenta “Google Acadêmico”. Dentre as 265 referências, o maior número de citações em um só trabalho foi de 1.062 citações, para o artigo “*A Green Vehicle Routing Problem*” (ERDOĞAN; MILLER-HOOKS, 2012). O ponto de corte definido foi de 50 citações, com a qual chegou-se a 56 trabalhos relevantes. Desse grupo, foi executado um novo filtro através da leitura dos resumos e restaram 47 publicações. Nesse processo foi também formulado o banco de autores.

Ao efetuar a filtragem inicial das citações, foram realizados mais dois agrupamentos com o objetivo de uma nova filtragem. Na primeira etapa, foram selecionados os trabalhos cujas datas de publicação são recentes, compreendidas entre 2022 e 2023. Ao final desse processo, foram analisados 41 trabalhos, dos quais 28 foram incluídos no banco de dados final e 13 foram excluídos devido a questões de pertinência ao tema da pesquisa.

No segundo agrupamento de referências, foram consideradas aquelas que não possuem relevância científica comprovada nem são recentes, mas possuem autores incluídos no banco de autores criado. Neste processo, foram adicionados mais 3 trabalhos. Unindo-se os três grupos de bibliografias (47 mais citadas, 28 atuais e 3 do banco de autores), foram selecionadas 78 publicações para leitura. Destas, 7 não estavam disponíveis para download na íntegra, enquanto 71 estavam disponíveis e foram descarregados para análise final.

### 3.5. CRIAÇÃO DO PORTFÓLIO FINAL DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Após a leitura dos 71 trabalhos, foi construída uma classificação de aderência dos estudos em relação ao tema da dissertação. Essa classificação foi composta por três níveis: alta, média e baixa. Através dessa classificação foram selecionados os trabalhos que seriam analisados na seção seguinte e quais seriam excluídos.

Dos 71 documentos lidos, 15 foram classificados como de alta aderência. Outros 14 como de média aderência e os demais 32 como de baixa aderência. Com isso, os 29 trabalhos que compõem o portfólio final da revisão sistemática são listados no Quadro 4.

Quadro 4 – Portfólio final da Revisão Sistemática

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>Aderência</b>
Sevgi Erdoğan; Elise Miller-Hooks.	A Green Vehicle Routing Problem	2012	Alta
Canhong Lin; K.L. Choy, G.T.S. Ho, S.H. Chung, H.Y. Lam.	Survey of Green Vehicle Routing Problem: Past and future trends	2014	Alta
Goran Ćirović; Dragan Pamučar; Darko Božanić.	Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model	2014	Alta
Giusy Macrina; Luigi Di Puglia Pugliese; Francesca Guerriero; Gilbert Laporte	The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows	2019	Alta
Jaber Jemai; Manel Zekri; Khaled Mellouli.	An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem	2012	Alta
Mohammad Asghari; S. Mohammad J. Mirzapour; Al-e-hashem.	Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review	2021	Alta
Reza Moghdani; Khodakaram Salimi fard; Emrah Demir; Abdelkader Ben yettou.	The green vehicle routing problem: A systematic literature review	2021	Alta
M. Afshar-Bakeshloo; A. Mehrabi; H. Safari, M. Maleki.	A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria	2016	Alta
Júlio César Ferreira; Maria Teresinha Arns Steiner & Osiris Canciglieri Junior.	Multi-objective optimization for the green vehicle routing problem: A systematic literature review and future directions	2020	Alta
Heng Wang; Menghan Li; Zhenyu Wang; Wei Li; Tianjiao Hou; Xianyi Yang; Zhenzhen Zhao; Zhenfeng Wang; and Tong Sun.	Heterogeneous Fleets for Green Vehicle Routing Problem With Traffic Restrictions	2022	Alta
Alejandro Fernández Gil, Eduardo Lalla-Ruiz, Mariam Gómez Sanchez, and Carlos Castro.	A Review of Heuristics and Hybrid Methods for Green Vehicle Routing Problems considering Emissions	2022	Alta
Zeynep Aydinalp Birecik; Dogan Ozgen.	An interactive possibilistic programming approach for green capacitated vehicle routing problem	2022	Alta
Yufeng Zhou, Changshi Liu, and Qing Xu.	Time-Dependent Green Location-Routing Problem under Carbon Cap-and-Trade Policy	2022	Alta
Afsane Amiri, Saman Hassanzadeh Amin, Hossein Zolfaghariania.	A bi-objective green vehicle routing problem with a mixed fleet of conventional and electric trucks: Considering charging power and density of stations	2023	Alta
Özgür Kabadurmuş, Mehmet Serdar Erdoğan	Bi-Objective green vehicle routing problem minimizing carbon emissions and maximizing service level	2022	Alta

<b>Autores</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>Aderência</b>
Ángel Felipe M; Teresa Ortuño; Giovanni Righini; Gregorio Tirado.	A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges	2014	Média
Yiyong Xiao, Abdullah Konak.	The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion	2016	Média
Alejandro Montoya; Christelle Guéret; Jorge E.; Mendoza; Juan G. Villegas.	A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem	2016	Média
G.Poonthalir; R.Nadarajan.	A Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint (F-GVRP)	2018	Média
Yunyun Niu; Zehua Yang; Ping Chen; Jianhua Xiao.	Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost	2018	Média
Giusy Macrina; Gilbert Laporte; Francesca Guerriero; Luigi Di Puglia Pugliese.	An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet	2019	Média
Hamed Soleimani; Yusof Chaharlang; Hadi Ghaderi.	Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria	2018	Média
Erfan Babaei Tirkolaee; Ali Asghar Rahmani Hosseinabadi; Mehdi Soltani; Arun Kumar Sangaiah; Jin Wang.	A Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Trip Green Capacitated Arc Routing Problem in the Scope of Urban Services	2018	Média
Chun Cheng; Peng Yang; Mingyao Qi; Louis-Martin Rousseau.	Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet	2017	Média
Yiyong Xiao; Abdullah Konak.	A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing & scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness	2015	Média
Sakthivel Madankumar, Chandrasekharan Rajendran.	Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain	2018	Média
Shuai Zhang; Yuvraj Gajpal; S. S. Appadoo	A meta-heuristic for capacitated green vehicle routing problem	2018	Média
Surendra Reddy Kancharla, Gitakrishnan Ramadurai.	Incorporating driving cycle based fuel consumption estimation in green vehicle routing problems	2018	Média
J. Behnamian, M. Ghadimi & M. Farajiamiri.	Data mining-based firefly algorithm for green vehicle routing problem with heterogeneous fleet and refueling constraint	2022	Média

Fonte: elaboração do autor (2023).

Considerando a relevância da origem dos trabalhos coletados para o tema da dissertação, avaliou-se os países onde os 29 estudos acima foram publicados. A China destaca-se como a principal fonte de produção científica da base selecionada, seguida por Irã e Índia. O Brasil possui uma publicação na lista.

Quadro 5 – Origem dos trabalhos selecionados

<b>País</b>	<b>Trabalhos</b>
China	7
Irã	5
Índia	4



Estados Unidos	3
Itália, França e Turquia	2
Argélia, Alemanha, Austrália, Brasil, Chile, Colômbia, Espanha, Hong Kong, Portugal, Países Baixos, Sérvia, Tunísia	1

Fonte: elaboração do autor (2023).

### 3.6. ANÁLISE DA LISTA DE TRABALHOS FINAL

Os 29 artigos selecionados para o portfólio final da revisão sistemática visam responder à pergunta de pesquisa formulada para esse trabalho de dissertação: “As técnicas atuais de roteirização verde são aplicáveis a realidade brasileira?”. Além disso, as diferentes origens das publicações selecionadas permitem analisar as características levadas em consideração nos métodos a partir de diferentes perspectivas locais, fornecendo subsídio para a análise da aplicação desses métodos ao cenário brasileiro.

Dentro da base de conhecimento coletada alguns trabalhos analisados apresentam revisões da base de conhecimento existente até o momento de suas publicações a respeito da roteirização verde. Asghari e Al-e-hashem (2021) e Moghdani *et al.* (2021) permitiram a elaboração de uma base de conhecimento sólida a respeito da roteirização verde, trazendo perspectiva sobre o avanço do estado da arte do assunto e abordando tópicos como definições, técnicas de otimização e métodos existentes para resolução do problema.

No estudo do estado da arte da roteirização verde, Asghari e Al-e-hashem (2021) classificam o problema sobre duas perspectivas diferentes: métodos de solução e características do problema. Dentro de cada grupo, são detalhados todos os métodos existentes (exatos, heurísticos e meta-heurísticos) para a solução do problema, bem como são detalhados os cenários existentes e seus respectivos componentes que devem ser levados em consideração para resolução. Além dessa classificação, o artigo apresenta uma revisão sistemática com 313 artigos coletados entre os anos 2000 e 2020, demonstrando um crescimento significativo no volume de pesquisas desenvolvidas na última década em relação ao início dos anos 2000.

Na revisão sistemática conduzida por Salimifard e Benvettou (2021), o problema da roteirização verde é subdividido em 7 diferentes variantes, as quais são elencadas em função das diferentes características de abordagem. Nesse sentido, é criado um *framework* de trabalho para seleção e triagem dos artigos selecionados durante a revisão, através do qual os trabalhos relevantes são classificados em uma das 7 categorias e analisados. Por fim, os autores projetam a quantidade de artigos publicados por ano para cada uma das 7 variantes, demonstrando o crescimento notável do interesse pelo tema ao longo dos anos.

Lin *et al.* (2014) fornecem de forma similar aos artigos acima citados uma metodologia de classificação dos diferentes tipos de roteirização verde existentes e mencionados nas bibliografias. A classificação permite a compreensão da variedade de abordagens dentro da área, bem como uma comparação entre as diferentes metodologias e suas aplicabilidades aos diferentes cenários locais, de operação e tecnológico.

Além da coleta de artigos, revisão e classificação, o artigo propõe um terceiro passo dentro da pesquisa: “como a roteirização tradicional pode interagir com a roteirização verde na próxima onda de pesquisas sobre o tema?”. Os autores buscam analisar e projetar como os aspectos relacionados a poluição ambiental podem afetar e influenciar nas próximas pesquisas desenvolvidas.

Outra contribuição importante para o contexto da presente dissertação vem do trabalho Ferreira *et al.* (2020), únicos autores brasileiros selecionados na revisão. Este trabalho fornece uma revisão dos trabalhos publicados nos últimos anos a respeito do tema da roteirização verde, abordando em detalhes aspectos individuais dos artigos selecionados.

A pesquisa parte de uma base de 1.744 artigos encontrados através da base de dados da CAPES, os quais são filtrados até uma base final de 74 exemplares que são tratados no trabalho. Dentro desse volume de trabalhos, são definidos 19 tipos de variantes do problema da roteirização verde. São ainda detalhadas as origens dos estudos (país e fonte), a data de publicação, *software* utilizados nos métodos de resolução analisados, linguagens de programação mencionadas dentro outros detalhamentos. Um ponto que difere das demais revisões sistemáticas abordadas é um destaque ao aspecto social, além da questão econômica e ambiental.

A roteirização para veículos movidos a combustíveis alternativos, como elétricos, híbridos e renováveis, apareceu de forma recorrente nos trabalhos classificados para o portfólio final da revisão sistemática, por Erdoğan e Elise Miller-Hooks em 2012 e por Giusy Macrina *et al.* em 2019. Erdoğan e Miller-Hooks (2012) propõem um modelo matemático para auxiliar na investigação da relação entre emissão de carbono e nível de serviço na distribuição de mercadorias.

Tendo em vista a escassez de estações de recarga para veículos que utilizam combustíveis alternativos, a tendência é que o nível de serviço das entregas diminua com o aumento da frota híbrida. Nesse sentido, é formulada uma solução ótima de Pareto que visa auxiliar na tomada de decisão de uma dada companhia, indicando qual é a porcentagem da frota

que pode utilizar combustível alternativo e, ao mesmo tempo, manter a satisfação dos clientes em níveis aceitáveis.

Giusy *et al.* (2019) propõem como uma frota heterogênea de veículos a combustão e elétricos podem atender a uma dada demanda de entrega de forma a minimizar os custos, considerando a possibilidade de recarga para os veículos movidos a baterias. Para isso, é desenvolvido um modelo computacional meta-heurístico, o qual foi testado com o auxílio do *software* CPLEX.

Em relação especificamente aos veículos elétricos, o tema das estações de recarga é explorado por diversos trabalhos analisados durante a fundamentação teórica e a revisão sistemática. Nesse contexto, pelo menos 4 trabalhos do portfólio final de artigos abordam o tema. A inclusão de recargas dos veículos elétricos durante a geração das rotas é explorada por Montoya *et al.* (2016).

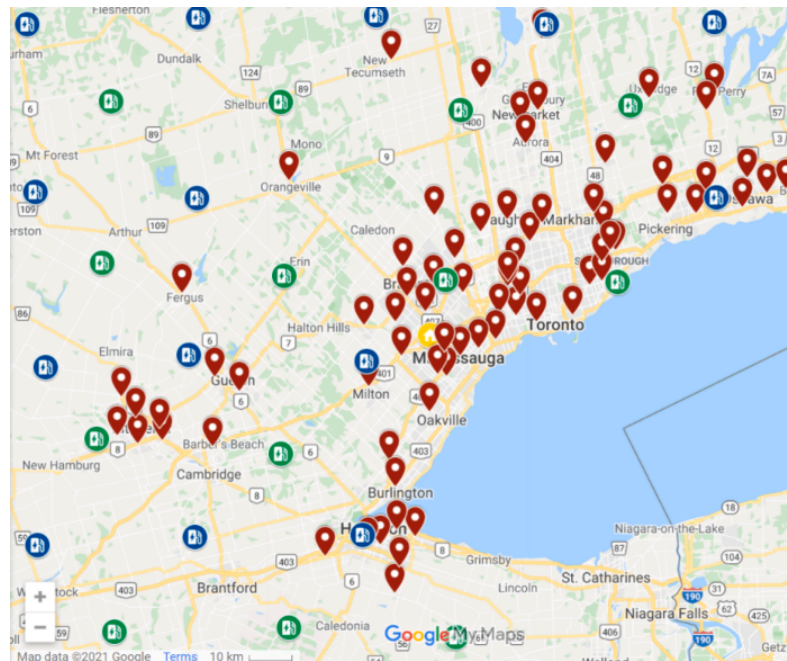
Ángel Felipe *et al.* (2014) abordam um método de recarga parcial das baterias dos veículos elétricos. Até então, os trabalhos existentes propunham a inclusão das recargas de forma integral nas rotas, restrição que foi removida no escopo da pesquisa.

Por fim, Afsane Amiri, Saman Hassanzadeh Amin e Hossein Zolfagharinia (2023) exploram como a densidade das estações de recarga dedicadas aos veículos elétricos é um fator crucial para a eficiência da roteirização. A densidade está diretamente relacionada à infraestrutura local da área de estudo. No trabalho, é avaliada a aplicação de uma frota mista de veículos elétricos e convencionais para atendimento a um grupo de clientes na região metropolitana de Toronto e partes de Ontario, ambos no Canadá.

O método analisa a melhor forma de atender as janelas de entregas dos clientes considerando a atual disponibilidade de estações de recarga nessas regiões do Canadá. É mencionado também o acordo de Paris de 2016, onde o Canadá se comprometeu em reduzir os gases de efeito estufa em 30% até 2030. Ademais, o governo canadense aponta que o setor de transportes foi responsável por 54% do aumento nas emissões entre 1990 e 2019, sendo que os veículos pesados são responsáveis por 70% desse volume de emissões.

O mapa de estações de recarga disponíveis na em Toronto pode ser visualizado na Figura 38. Com base nele, foram aplicadas as formulações desenvolvidas no método.

Figura 38 – Distribuição dos pontos de recarga de baterias



Fonte: Zolfagharinia et al., 2023.

Com a análise, os autores concluem que aumentando em duas vezes o número de estações de recarga disponíveis, seria possível reduzir em 2% o custo logístico das empresas de transporte. Além disso, apontam também que um aumento de 3% nos custos de transporte através do uso da frota verde pode gerar uma redução de 18% nos gases emitidos (ZOLFAGHARINIA *et al.*, 2023).

Outra característica local que foi observada nas publicações selecionadas para análise através da revisão sistemática foi a da taxa de emissões. O método proposto por M. Afshar-Bakeshloo *et al.* (2016) adiciona ao custo total da rota uma taxa de poluição calculada de acordo com as normas locais, permitindo a avaliação monetária das emissões geradas pela rota.

Considerando que veículos elétricos não emitem gases do efeito estufa, essa parcela do cálculo do custo de transporte fica zerado para o cenário de frota verde. O modelo computacional desenvolvido por Afshar-Bakeshloo *et al.* (2016) é aplicado a um cenário hipotético e são detalhadas algumas conclusões. É estimado que apenas 0,5% do custo total do transporte é relacionado as taxas de carbono.

A combinação desse tipo de taxa com restrições de acesso a áreas determinadas foi descrita por Heng Wang *et al.* (2022). Ambas as características têm relação direta com as características locais do cenário, tendo em vista que são geradas por legislações locais de acesso e taxa, o que também deverá ser levantado como foco de análise no seguinte capítulo.

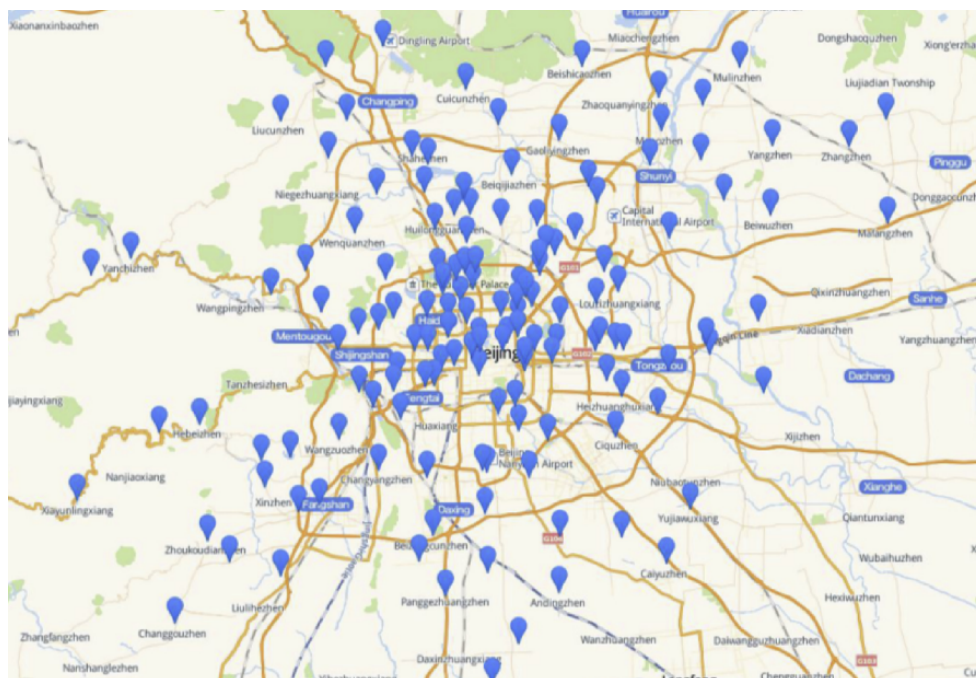
No artigo os autores Cirovic, Pamucar e Bozanic (2014) utilizam redes neurais para otimizar rotas urbanas de distribuição de mercadorias levando em consideração três critérios: custos logísticos, emissões e ruído. Através de um sistema de lógica *fuzzy*, o algoritmo proposto constrói rotas para um dado número de veículos a combustão ou elétricos inseridos no modelo, visando vincular as rotas com maior sensibilidade a poluição àqueles veículos verdes e alocando os demais às rotas menos críticas do ponto de vista ambiental.

Outro aspecto que influencia no nível de emissões dos veículos a combustão e pode ser mitigado através de rotas desenvolvidas de forma otimizada é a velocidade média de trânsito. Poonthalir e Nadarajan (2018) desenvolveram uma otimização de dois objetivos (*bi-objective optimization*) através de uma programação por objetivos (*goal programming*) e distribuição triangular, visando redução de custos e economia de combustível.

A pesquisa mostrou que o uso de um plano de intervalos de velocidades pode reduzir o consumo de combustível e, portanto, reduzir o número de veículos necessários para atender a uma determinada demanda. Além disso, a pesquisa observou que a velocidade constante consome mais combustível do que a variação de velocidade. A pesquisa sugere ainda que o modelo pode ser estendido para estudar o impacto em outras situações, como roteamento elétrico ou com veículos híbridos, e incluir outras restrições como condições de estrada e carga dos veículos.

Xiao *et al.* (2018) comparam a distribuição de uma frota em rotas com diferentes condições de tráfego e medem, a partir de critérios relacionados aos veículos e as condições de tráfego das vias, as variações nos custos de transporte entre os veículos direcionados a rotas “cheias” em relação a rotas “vazias”. Os autores utilizam para aplicação do método a necessidade de entrega em 120 clientes na cidade de Pequim, na China, conforme pode ser visto no mapa exibido na Figura 39 abaixo.

Figura 39 – pontos dos clientes na cidade de Pequim, China



Fonte: Xiao et al., 2018.

Os resultados apontam que o trânsito em rotas menos congestionadas diminui em cerca de 20% o custo de combustível e em 30% o nível das emissões de CO<sub>2</sub>. Nos experimentos executados nas rotas congestionadas, os custos de combustível e emissão sobem 12% e o custo com o motorista 31%.

Além dos assuntos acima abordados, outros tópicos também foram mencionados na base final da revisão, como o mercado de carbono por Zhou *et al.* (2022), os ciclos de viagem por Kancharla e Ramadurai (2018) e a logística reversa – por Soleimani *et al.* (2018). Essas informações serão consideradas na análise do método descrito no capítulo 4.

Em relação a origem dos trabalhos, observou-se uma grande distribuição geográfica dos trabalhos elencados como principais fontes para a elaboração da presente dissertação. Esse fato vem de encontro a percepção inicial de que o estado da arte sobre a roteirização verde estava restrito aos países da América do Norte e Europa.

O Quadro 5 – Origem dos trabalhos selecionados demonstrou que a distribuição da bibliografia é consideravelmente uniforme e permite a compreensão de que diversos cenários foram levados em consideração para a formulação desses estudos. De todo modo, a aplicação desses métodos ao cenário brasileiro segue sendo um dos principais eixos da pesquisa, uma vez que nenhum artigo encontrado durante os dois capítulos de fundamentação teórica e revisão sistemática trouxe essa abordagem.

#### 4. ANÁLISE DOS MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE APLICADOS A REALIDADE BRASILEIRA

Com a conclusão dos capítulos de fundamentação teórica e revisão sistemática, os primeiros objetivos específicos definidos no capítulo 1 foram atendidos: (a) levantamento dos impactos gerados pelo setor de transportes no meio ambiente; e (b) identificação do estado da arte da roteirização verde a partir de uma revisão da literatura existente. Para dar seguimento ao trabalho e responder aos outros dois objetivos propostos, foram desenvolvidos no presente capítulo:

- Uma análise dos critérios utilizados no desenvolvimento dos métodos de roteirização verde nos artigos selecionados e sua relação com as características locais;
- Elaboração de diretrizes para a construção de um método de roteirização verde orientado ao cenário brasileiro, levando-se em consideração os critérios locais de roteirização verde mapeados e sua aplicabilidade ao Brasil.

Com isso, foi possível contribuir para o avanço das pesquisas e desenvolvimento de aplicações na área e responder à pergunta de pesquisa formulada no início do projeto: **as técnicas atuais de roteirização verde são aplicáveis a realidade brasileira?**

##### 4.1. MAPEAMENTO DOS CRITÉRIOS UTILIZADOS PARA DESENVOLVIMENTO DOS MÉTODOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE

A roteirização verde é uma abordagem que busca minimizar o impacto ambiental das operações logísticas, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa e o consumo de recursos naturais. Para isso, são utilizados métodos específicos que levam em conta uma série de critérios, tanto locais quanto globais.

A partir dos trabalhos elencados e filtrados dentro da revisão sistemática, que propõem novos métodos de roteirização verde, são listados abaixo, para cada um deles, quais os critérios utilizados dentro dos estudos (Quadro 6).

Quadro 6 - Mapeamento dos critérios encontrados nas bibliografias

Título	Ano	Crítérios abordados
A Green Vehicle Routing Problem	2012	Disponibilidade de estações de reabastecimento
Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model	2014	Disponibilidade de veículos Característica da rota
The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows	2019	Janela de entrega Disponibilidade de estações de recarga

<b>Título</b>	<b>Ano</b>	<b>Crítérios abordados</b>
An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem	2012	Peso do veículo Velocidade do veículo Congestionamento de tráfego Condições climáticas
A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria	2016	Nível de serviço Nível de emissão dos veículos
Heterogeneous Fleets for Green Vehicle Routing Problem With Traffic Restrictions	2022	Taxação de emissões Restrições de tráfego
An interactive possibilistic programming approach for green capacitated vehicle routing problem	2022	Consumo de combustível
Time-Dependent Green Location-Routing Problem under Carbon Cap-and-Trade Policy	2022	Consumo de combustível Taxação de emissões
A bi-objective green vehicle routing problem with a mixed fleet of conventional and electric trucks: Considering charging power and density of stations	2023	Disponibilidade de veículos Disponibilidade de estações de recarga
Bi-Objective green vehicle routing problem minimizing carbon emissions and maximizing service level	2022	Nível de serviço Nível de emissão dos veículos Disponibilidade de veículos
A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges	2014	Disponibilidade de estações de recarga
The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion	2016	Congestionamento de tráfego
A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem	2016	Disponibilidade de veículos mista
A Fuel Efficient Green Vehicle Routing Problem with varying speed constraint (F-GVRP)	2018	Velocidade média
Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost	2018	Congestionamento de tráfego
An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet	2019	Disponibilidade de veículos mista Disponibilidade de estações de recarga
Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery considering sustainable and green criteria	2018	Logística reversa
A Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Trip Green Capacitated Arc Routing Problem in the Scope of Urban Services	2018	Ocupação do veículo
Modeling a green inventory routing problem with a heterogeneous fleet	2017	Disponibilidade de veículos
A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing & scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness	2015	Janela de entrega Congestionamento de tráfego
Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain	2018	Logística reversa
A meta-heuristic for capacitated green vehicle routing problem	2018	Disponibilidade de veículos combustão alternativo Disponibilidade de pontos de abastecimento
Incorporating driving cycle based fuel consumption estimation in green vehicle routing problems	2018	Velocidade média de viagem
Data mining-based firefly algorithm for green vehicle routing problem with heterogeneous fleet and refueling constraint	2022	Disponibilidade de veículos mista Disponibilidade de estações de recarga

\*Revisões bibliográficas que não propuseram métodos específicos.

Fonte: elaborado pelo autor (2023)



Os critérios utilizados pelos autores para elaboração dos métodos de roteirização verde são listados abaixo:

- Disponibilidade de veículos a combustão movidos a combustível alternativo;
- Disponibilidade de veículos híbridos e elétricos;
- Disponibilidade de estações de recarga de bateria;
- Disponibilidade de pontos de abastecimento com combustível alternativo;
- Congestionamento de tráfego;
- Velocidade média de trânsito;
- Condições climáticas;
- Nível de emissão dos veículos;
- Nível de emissão de ruído;
- Ocupação dos veículos;
- Consumo de combustível dos veículos;
- Taxação de emissão de carbono (impostos sobre emissões);
- Restrições de tráfego (limitações de trânsito para determinados veículos);
- Janela de entrega (prazo de entrega);
- Nível de serviço de entrega;
- Logística reversa.

Esses critérios podem ser utilizados e aplicados de forma isolada, bem como de forma combinada, a depender da proposta do autor. Na sequência, os critérios mencionados acima são agrupados em diferentes categorias e analisados. As categorias permitiram a seleção dos critérios que foram estudados em detalhes na parte final do trabalho.

#### 4.2. CATEGORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE

Os critérios abordados nas bibliografias podem ser agrupados em grupos relacionados às suas características. Essa divisão é feita no presente trabalho de forma a organizar o detalhamento dos temas, considerando o objetivo do trabalho. A proposição abaixo foi elaborada pelo autor.

1. Veículos e Infraestrutura sustentável:
  - Disponibilidade de veículos verdes (elétricos, híbridos, alternativos);
  - Disponibilidade de estações de recarga e reabastecimento;

- Eficiência energética (consumo de combustível, ocupação e nível de emissão dos veículos);
  - Nível de emissão de ruído.
2. Condições locais:
    - Condições climáticas;
    - Congestionamento de tráfego;
    - Velocidade média de trânsito.
  3. Restrições de acesso e Regulamentações:
    - Restrições de tráfego (limitações de trânsito para determinados veículos);
    - Taxação de emissão de carbono (impostos sobre emissões).
  4. Operações Logísticas Sustentáveis:
    - Janela de entrega (prazo de entrega);
    - Nível de serviço de entrega;
    - Logística reversa.

Os primeiros dois agrupamentos fazem referência aos veículos utilizados nos métodos de roteirização verde, bem como à infraestrutura necessária para isso. Ambos os temas estão diretamente relacionados e podem variar de forma significativa de acordo com a região em que são aplicados. Exemplo disso pode ser a disponibilidade de veículos elétricos e estações de recarga em um dado país comparado a outro. De forma similar, as condições locais variam de acordo com a localidade onde a proposta é desenvolvida, o que pode impactar na aplicabilidade dos métodos.

O terceiro agrupamento refere-se fundamentalmente a questões regulatórias/legais. As restrições aplicadas os determinados tipos de veículos estão sempre relacionados a localidade. O que varia nesse caso é a razão pela qual a restrição é aplicada, podendo ser por critérios de sustentabilidade ou simplesmente por questões de espaço ou tráfego. As taxações sobre emissões também seguem o caminho da regulamentação e, por conseguinte, estão intrinsecamente relacionadas as leis existentes no local.

Por fim, os critérios classificados dentro do grupo de operações logísticas sustentáveis tratam da forma de execução das rotas, visando a otimização do uso dos veículos visando a atender tanto critérios de entrega (nível de serviço, por exemplo), quanto ambientais. Nesses casos, a localidade é menos impactante, uma vez que a execução de uma rota de forma a atender

as janelas de entrega de um determinado cliente, por exemplo, independe de onde esse cliente está (país, região etc.).

Na sequência, os quatro grupos de critérios são analisados sob a ótica da localidade e seu impacto na aplicação dos métodos, permitindo assim a construção da resposta do tema principal da pesquisa, que é a avaliação da aplicabilidade dos métodos de roteirização verde ao cenário brasileiro.

#### 4.2.1 VEÍCULOS E INFRAESTRUTURA SUSTENTÁVEL

Os critérios de roteirização verde relacionados aos veículos são abordados de diversas formas nas bibliografias revisadas. A disponibilidade de frota de veículos elétricos ou veículos movidos a combustível alternativo é mencionada em bibliografias vinculadas a disponibilidade restrita dos pontos de reabastecimento ou recarga, dependendo do tipo de veículo. Além disso, a eficiência dos veículos verdes é avaliada de forma conjunta nessa seção.

O uso de frota mista, ou seja, composta por veículos verdes em conjunto com veículos convencionais é citada como uma solução para cenários onde a empresa de transporte dispõe de ambos os tipos de veículos e pode, de forma otimizada, fazer uso dos veículos verdes em rotas onde existem pontos de recarga/reabastecimento disponível. Alguns autores, como Pugliese *et al.* (2019), propõem um segundo nível de análise a partir dos métodos propostos no começo da década de 2010 por Laporte (2012) e Erdogan (2012), aprofundando as soluções iniciais com novos critérios relacionados a roteirização verde não explorados.

Em relação aos critérios que avaliam os veículos verdes, são avaliadas propostas como a recarga parcial de baterias ao invés da recarga total, uso da energia gerada pelos freios para recarga das baterias e, nos casos de veículos com combustível alternativo, é analisado o consumo de combustível a partir de critérios como ocupação e peso do veículo.

Os estudos supracitados não mencionam características locais específicas de onde seriam aplicados, utilizando cenários fictícios de aplicação, a partir de grafos compostos por depósitos (pontos de origem), clientes (destinos), estações de recarga ou reabastecimento. Porém, outros três trabalhos mencionam seus locais de aplicação e permitem, de forma prática, a análise comparativa dessas características locais às mesmas características no Brasil.

Erdogan (2012) analisa o uso de veículos com combustível alternativo e trata dos incentivos para o uso de veículos com combustíveis menos poluentes. Nesse contexto, menciona que *Federal Highway Administration – FHWA* (EUA) exige que para empresas com mais de 20 veículos em sua frota e tenham uma redução de 2% no volume de emissões por ano,

em relação ao nível de emissão do ano anterior. Além disso, o uso de veículos com combustível alternativo deve ser aumentado em 10% por ano.

Bozanic (2014) aborda um método de roteirização verde que visa a comparação entre duas frotas distintas, uma contendo veículos tradicionais e outra de veículos verdes. O contexto do trabalho está relacionado a um esforço do governo sérvio em medir os níveis de emissão e ruído nas principais cidades do país. Estudos desenvolvidos pelos órgãos competentes indicam que mais de 50% dos gases de efeito estufa gerados nas principais cidades sérvias são resultado de emissões de veículos poluentes, com destaque para os caminhões. O trabalho de Bozanic (2014) permite a roteirização desses veículos elétricos através da disponibilização das estações de recarga disponíveis na capital Belgrado.

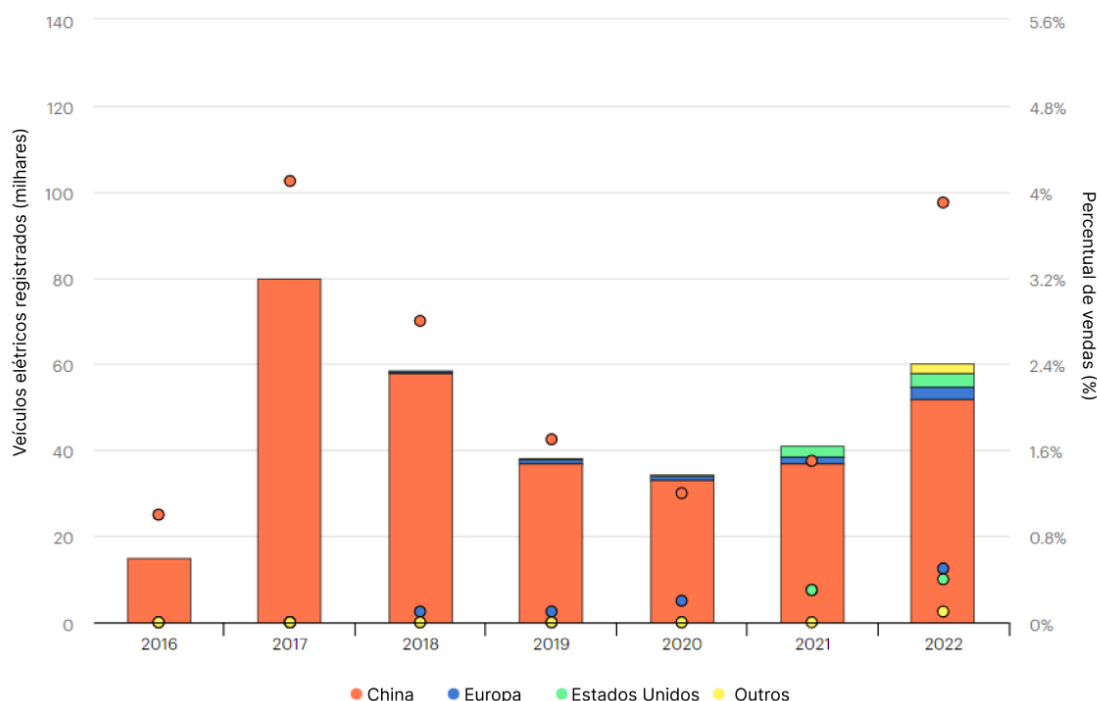
Zolfagharinia *et al.* (2023) analisam a aplicação de uma frota mista de veículos elétricos e convencionais para atendimento a um grupo de clientes na região metropolitana de Toronto e partes de Ontario, ambos no Canadá. O método analisa a melhor forma de atender as janelas de entregas dos clientes considerando a atual disponibilidade de estações de recarga nessas regiões do Canadá. O estudo cita o acordo de Paris onde o Canadá se comprometeu em reduzir os gases de efeito estufa em 30% até 2030.

Os três trabalhos que mencionam localidades em suas proposições estão localizados no hemisfério norte, sendo dois na América do Norte e um na Europa. Nos três casos, as iniciativas de desenvolvimento dos métodos partiram de regulações feitas pelos órgãos governamentais responsáveis pelos controles de emissões desses países, que possuem metas de redução da poluição gerada no setor de transportes.

A disponibilidade de veículos verdes e de infraestrutura de suporte ainda é algo restrito a poucos países. Segundo dados da *International Energy Agency* (2023), o número de caminhões elétricos registrados nos últimos anos tem variado. O gráfico da Figura 40 demonstra o número total de veículos pesados elétricos vendidos nos últimos 7 anos, exibindo em barras a quantidade total de unidades e, nas bolinhas, o percentual desses veículos em relação ao total de veículos pesados comercializados. O gráfico é separado em 4 grupos: China, Europa, Estados Unidos e demais países.

O pico de registros ocorreu em 2017, onde cerca de 80 mil veículos foram registrados apenas na China, correspondendo a cerca de 4% de toda a frota de veículos registrados naquele ano, que também foi o maior percentual.

Figura 40 – Número de veículos pesados elétricos vendidos nos últimos anos



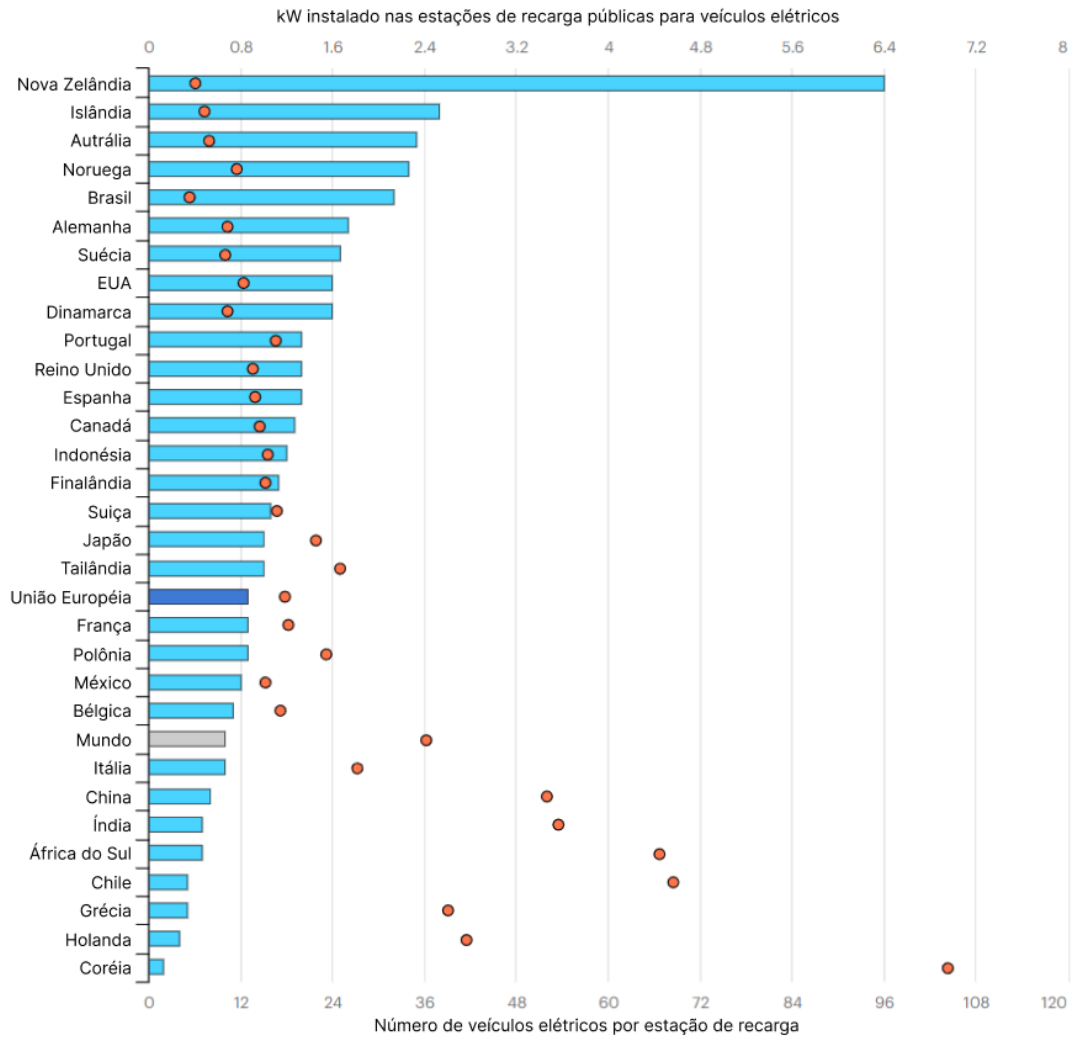
Fonte: IEA, 2023.

Desde então, observa-se um crescimento de participação da Europa, Estados Unidos e outros países na comercialização desses veículos, porém ainda muito aquém dos números expressivos apresentados pela China. No Brasil, o número de veículos pesados elétricos tem apresentado expressivo aumento nos últimos anos, em termos percentuais. Na comparação entre o primeiro trimestre de 2021 e de 2022, a venda de caminhões e ônibus elétricos cresceu de 32 unidades para 177, segundo dados da ANFAVEA (2022). Porém, apesar da alta, o volume representa menos de 1% do total de veículos pesados comercializados no período.

Esse percentual pode ser observado no gráfico acima pelas bolinhas azuis (Europa), verdes (EUA) e amarelas (outros). Em exceção a China, todos os demais países apresentam um percentual menor que 1% de veículos elétricos vendidos em relação ao total de veículos vendidos.

Apesar do cenário acima exposto, em relação a infraestrutura, outros países apresentam números importantes de disponibilidade de estações de recarga em relação a frota de veículos elétricos. No gráfico da Figura 41, é possível visualizar nas barras azuis a capacidade instalada de recarga (em kW) para cada veículo elétrico registrado, bem como quantificar o número de veículos elétricos existentes para cada estação de recarga disponível (bolinhas). Dentro os países com maior disponibilidade estão a Nova Zelândia, Islândia, Austrália, Noruega e Brasil.

Figura 41 – Capacidade das estações de recarga disponíveis nos países



Fonte: IEA, 2023.

A China, por sua vez, encontra-se próxima a média mundial nessa análise. Porém, diferente do restante dos países, o valor baixo de disponibilidade de estações de recarga por veículo decorre do fato de o país possuir uma frota muito maior de veículos elétricos quando comparado aos demais, conforme foi possível analisar no gráfico da Figura 40.

Segundo dados da Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE), o número de estações de recarga para veículos elétricos em maio de 2023 é de 3.250, com uma projeção para que até 2024 o número chegue a 5.000. Esse número, como também visto no gráfico anterior, coloca o Brasil acima da média mundial e fornecem condições competitivas para que o uso de veículos elétricos, tanto leves quanto pesados, se intensifique (ESTADÃO, 2023).

Apesar do crescimento evidente da presença dos veículos verdes na frota, um fator ainda impede uma transição ainda mais rápida: o custo-benefício. Em rotas urbanas, onde a autonomia deixa de ser uma questão impeditiva, podendo ser tratada como critério da roteirização das

viagens, o custo de compra dos veículos elétricos ainda impede com que esses veículos sejam a maioria dos veículos vendidos em todos os países, atingindo um limite de 4% da frota no país mais avançado nesse sentido, a China.

Nesse sentido, o departamento de energia dos Estados Unidos publicou em março de 2022 o estudo chamado “*DOE Projects Zero Emissions Medium- and Heavy-Duty Electric Trucks Will Be Cheaper than Diesel-Powered Trucks by 2035*” onde avalia que, a partir de 2035, os veículos pesados elétricos serão mais baratos que os veículos movidos a diesel. No estudo é mencionado que antes de 2030 os caminhões de pequeno porte atingirão a competitividade financeira e, a partir de 2035, os caminhões pesados também o farão.

Esse cenário será atingido devido aos avanços no desenvolvimento das células de combustível de hidrogênio, tecnologia que deverá auxiliar na eletrificação da frota de longa-distância (a partir de 500km). Além dos avanços tecnológicos, é mencionado também um aporte de \$7 bilhões em investimentos na rede de recarga de baterias nacional, visando atingir um total 500 mil estações de recarga até 2035 (DOE, 2023).

De forma similar aos Estados Unidos, a Nova Zelândia lançou em 2020 o “*Green Freight – Strategic Working Paper*” que consiste em demonstrar os passos que o país deverá adotar nos próximos anos para descarbonizar sua frota de veículos pesados. No documento são citados estudos de casos que estão sendo conduzidos por empresas e acompanhadas pelo Ministério de Transportes local para avaliar soluções de redução das emissões vinculadas ao transporte de cargas.

São mencionadas ações em curso para a aceleração da neutralização das emissões no setor como: a substituição do combustível dos veículos para combustíveis verdes com baixo nível de carbono, através de incentivos financeiros para o uso desses, criação de um mercado de carbono para penalização dos maiores emissores de poluentes, criação de padrões veiculares com níveis máximos de emissões, aumentando incentivos fiscais para tecnologias de baixa emissão, e restringindo o trânsito de veículos poluentes em certas cidades e regiões (NZMT, 2023).

De forma similar aos EUA e a Nova Zelândia, a Europa também possui diversas estratégias de eletrificação da frota, com 21 países membros da União Europeia oferecendo incentivos à população para compra de carros e caminhões elétricos (ACEA, 2022). Dentre os incentivos estão descontos em impostos, *cashback*, e isenção em taxas recorrentes de uso do veículo, além de acesso a estacionamentos sem custos.

No Brasil, alguns estados como São Paulo e Rio de Janeiro já oferecem benefícios como a isenção de participação no rodízio e descontos em IPVA para incentivar a venda e uso dos veículos elétricos. Porém, em comparação com os países do hemisfério norte, os incentivos são muito tímidos, tendo em vista que não existe uma política nacional de incentivo. O presidente da ABVE, Adalberto Maluf, comenta sobre:

“O atual governo do Joe Biden quer investir US\$ 2 trilhões (algo em torno de R\$ 10 trilhões) na conta entra uma política de subsídios para a indústria do futuro. Da mesma forma ocorre na Europa, quando a Alemanha investe € 20 bilhões de euros para fazer a transformação do parque industrial atual olhando para o futuro. Ou seja, isso mostra que esses países estão levando a sério a política industrial (ESTADÃO, 2021).”

O atual programa que incentiva investimentos no setor automobilístico brasileiro é o Rota 2030, que aponta metas para aumento da eficiência energética das montadoras presentes no país, porém não injeta dinheiro no setor, deixando o Brasil para trás dos líderes em eletrificação.

Quando avaliados os trabalhos que tratam da eficiência energética dos veículos, é possível observar o objetivo dos autores em relacionar redução nas emissões com possível aumento no custo logístico. Ozgen e Birecik (2022) propõe um método para aumentar a “pontuação verde” das rotas sem elevar o custo monetário de execução delas, com a utilização de um cenário real de aplicação, em uma dada localidade da Turquia

Nos trabalhos de Wang *et al.* (2018) e Kabadurmuş e Erdoğan (2022) são discutidos também a relação de troca entre ganhos em sustentabilidade e perdas financeiras decorrentes. A otimização da eficiência energética dos veículos varia com base no tipo de veículo e no uso dele, através da forma de conduzir e da rota escolhida para atender os pontos de entrega e/ou coleta. Esses critérios de eficiência, contudo, não estão vinculados a localidade e sim a forma de utilização dos veículos. O consumo de combustível, o nível de ocupação e o nível de emissão e ruído dos veículos tratam de como os veículos respondem a determinados cenários de uso e não a características ambientais externas. Nesse sentido, não é possível auferir como os critérios se diferenciam quando aplicados localidades distintas, por exemplo.

Por fim, dentro dos critérios categorizados como “veículos e infraestrutura sustentável” foram construídas diferentes conclusões quanto a aplicabilidade ao cenário brasileiro. Se por um lado a infraestrutura dos postos de recarga de baterias está acima da média mundial em números absolutos comparando quantidade de veículos e postos de recarga, permitindo o uso de veículos verdes sem maiores problemas quando comparado a outros países, a ausência de incentivos governamentais para a migração da frota rumo a eletrificação é um ponto negativo.



A ausência de incentivos governamentais expressivos, como observado em outros países desenvolvidos e em desenvolvimento, diminui a velocidade da migração para o uso de veículos carbono-neutro para o transporte de cargas, impactando na relevância dos métodos de roteirização verde que fazem uso da disponibilidade de veículos verdes como critério principal.

De toda forma, a disponibilidade de estações de recarga existente no Brasil e o aumento da frota de veículos verdes observado nos últimos anos permite a aplicação dos métodos de roteirização verde que fazem desses critérios aplicáveis à realidade brasileira. Por outro lado, os critérios que avaliam a eficiência energética dos veículos para mitigação das emissões não abordam características locais em seus estudos. Nesse sentido, esses critérios podem ser considerados aplicáveis por não exigirem características locais.

#### 4.2.2 CONDIÇÕES LOCAIS

As condições climáticas exercem impacto direto na eficiência da roteirização. Chuvas intensas, neve ou outras condições adversas podem afetar não apenas a segurança da viagem, mas também o consumo de combustível, as emissões e as rotas disponíveis para trânsito. Além disso, temperaturas extremas têm implicações na eficiência dos veículos, influenciando diretamente o desempenho ambiental da rota.

O congestionamento de tráfego é um desafio significativo na roteirização verde. O tempo gasto em situações de trânsito congestionado não apenas aumenta o tempo total de viagem, mas também contribui para um maior consumo de combustível e emissões. Estratégias eficazes de roteirização visam minimizar a influência negativa do congestionamento, priorizando rotas menos congestionadas sempre que possível.

Mellouli *et al.* (2012) aplicam, em seu método NSFA-II para roteirização de veículos, os critérios de condições climáticas e nível de congestionamento das rodovias, além de características dos veículos como peso e velocidade de trânsito. Em relação às condições climáticas, os autores indicam que a velocidade do vento pode impactar no consumo de combustível, devido ao arrasto gerado. A temperatura elevada, por sua vez, impacta em um maior uso do ar-condicionado nos veículos, aumentando a carga no motor, afetando sua eficiência energética.

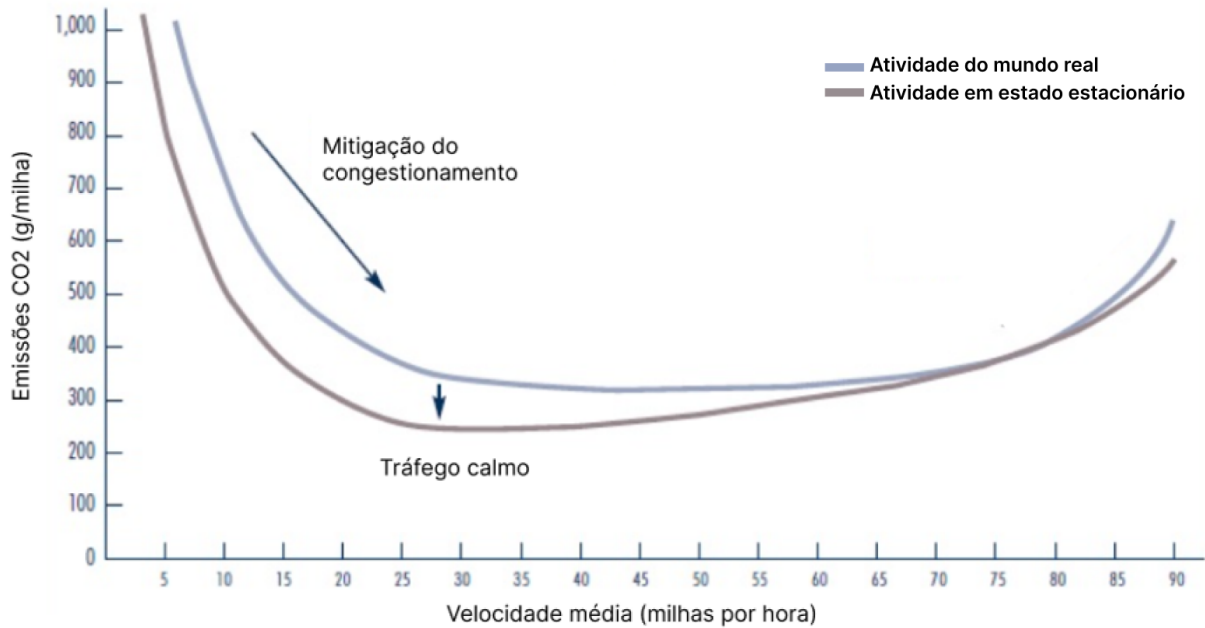
No estudo não é utilizado um cenário real de aplicação. Os autores indicam um cenário fictício em que são testadas as proposições, sem caracterização de como os critérios locais poderiam afetar no aumento ou diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>.

O impacto do congestionamento de tráfego na eficiência energética dos veículos é analisado por Konak e Xiao (2016). Os autores citam que os congestionamentos em rodovias podem aumentar emissões em até 300% e propõem um estudo que avalia a redução nos níveis de emissões quando os veículos são alocados nas rotas fora dos períodos de pico de trânsito. No trabalho os autores aplicam os métodos em cenários hipotéticos, sem mencionar locais reais.

Xiao *et al.* (2018) comparam a distribuição de uma frota em rotas com diferentes condições de tráfego e medem, a partir de critérios relacionados aos veículos e as condições de tráfego das vias, as variações nos custos de transporte entre os veículos direcionados a rotas “cheias” em relação a rotas “vazias”, em 120 clientes na cidade de Pequim, na China. Dentre os resultados da pesquisa, foi observado que os custos relacionados a combustível, emissões e ao motorista aumentaram muito em cenários com engarrafamentos. No experimento executado no estudo, os custos com combustíveis e emissões aumentaram 12,3% devido ao trânsito engarrafado, enquanto o aumento no horário de trabalho dos motoristas elevou suas remunerações em 31,3%. Como resultado, o custo total aumentou em média 25,9% quando foram escolhidas rotas congestionadas.

A velocidade média de trânsito é um elemento-chave na busca por eficiência ambiental e está diretamente relacionada com a existência ou não de congestionamento na rota. A roteirização verde visa otimizar a velocidade, levando em consideração a eficiência do veículo. Velocidades muito baixas ou muito altas geralmente resultam em maior consumo de combustível por quilômetro, o que pode aumentar as emissões de gases de efeito estufa. Portanto, ajustar a velocidade média para alcançar a eficiência máxima do combustível é uma consideração essencial na implementação de estratégias de roteirização sustentável. Esse comportamento pode ser observado a partir da análise do gráfico da Figura 42.

Figura 42 – variação do nível de emissão e da velocidade média



Fonte: Access Magazine, 2009.

O eixo vertical do gráfico indica o nível de emissão de CO<sub>2</sub> em gramas por milha, enquanto o eixo horizontal representa a velocidade média de trânsito, em milhas por hora, para um veículo hipotético. Conforme observado por estudos da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA), a eficiência dos veículos em termos de consumo de combustível por unidade de distância percorrida geralmente atinge seu pico em velocidades moderadas, declinando tanto em velocidades mais altas quanto mais baixas.

A resistência do ar aumenta significativamente em altas velocidades, resultando em uma demanda crescente de energia e, conseqüentemente, uma maior queima de combustível. Por outro lado, em velocidades mais baixas, especialmente em situações de tráfego congestionado, os veículos podem operar em condições menos eficientes, contribuindo para um aumento nas emissões de CO<sub>2</sub>. Essa relação complexa entre a velocidade do tráfego e as emissões veiculares destaca a importância de estratégias de gestão de tráfego e políticas de transporte para mitigar o impacto ambiental associado à mobilidade urbana.

Ramadurai e Surendra (2018) analisam a roteirização de veículos utilizando os ciclos de condução como base. Um ciclo de condução é um perfil velocidade-tempo de um veículo representativo que pode ser obtido a partir de uma série de micro-viagens. Uma micro-viagem é definida como a viagem entre o início e fim de dois períodos de inatividade e consegue capturar dessa forma as variações de aceleração das rotas. Com isso, são também identificados

os congestionamentos. O cenário fictício em que os autores aplicam o método resultou em rotas que são, em média, 8–12% mais eficientes em termos de combustível e 13–15% mais curtas em comparação com o uso de rotas baseadas em velocidades médias.

Por fim, os estudos que tratam dos critérios relacionados as condições locais climáticas e de tráfego indicam como essas características podem influenciar no resultado de consumo de combustível e emissões quando considerados. A obtenção de dados de congestionamento e temperatura são acessíveis e podem ser obtidas em qualquer localidade que disponha de acesso a dados da internet através de softwares gratuitos como Google e Waze, bem como através de bases disponibilizadas por sites governamentais que monitoram a situação do tráfego. Nesse sentido, é possível concluir que os métodos podem ser aplicados a realidade brasileira, uma vez que tanto os dados estão disponíveis, quanto as condições apresentadas são aderentes as características das rodovias brasileiras.

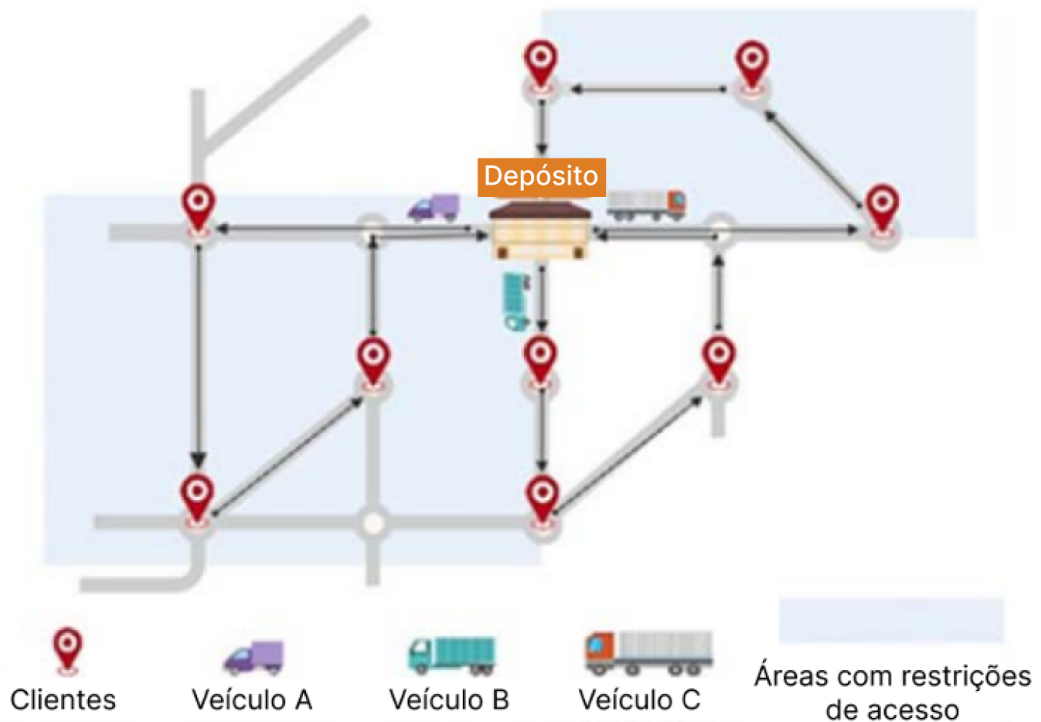
#### 4.2.3 RESTRIÇÕES DE ACESSO E REGULAMENTAÇÕES

No cenário da roteirização verde, as restrições de tráfego desempenham um papel crucial na promoção de práticas mais sustentáveis no transporte. Governos e autoridades locais implementam restrições de tráfego, limitando a circulação de veículos em áreas urbanas a fim de reduzir congestionamentos e minimizar as emissões de carbono. Essas restrições incentivam a utilização de veículos mais eficientes e amigáveis ao meio ambiente.

Além disso, a taxa de emissões de carbono pode ser utilizada como uma ferramenta eficaz para mitigar o impacto ambiental do transporte. Ao impor taxas sobre as emissões de carbono provenientes do transporte de mercadorias, as empresas são incentivadas a adotar práticas mais sustentáveis, como a utilização de frotas elétricas. Essa abordagem não apenas contribui para a redução das pegadas de carbono, mas também promove a inovação na indústria de fabricação de veículos verdes, impulsionando o desenvolvimento e gerando empregos.

Wang *et al.* (2022) elaboram um método que faz uso de três critérios: restrições de tráfego, tempo de viagem dos veículos e taxa de carbono. Além disso, para atendimento dos clientes é utilizada uma frota mista de veículos, composta de caminhões convencionais e elétricos, de forma a compor de forma otimizada as janelas dos clientes, considerando as restrições de acesso dispostas. Na Figura 43 pode-se observar um esquema simplificado de entendimento do cenário proposto.

Figura 43 – Cenário de aplicação do método proposto por Wang et al. (2022)1



Fonte: Wang et al., 2022.

As restrições de tráfego citadas por Wang *et al.* (2022) existem em diversos países e são conhecidas como Zonas de Baixa Emissão, do inglês *Low-emission zones* (LEZs). Essas áreas podem ser definidas como zonas que restringem o uso de veículos poluentes de forma parcial ou total, aplicando ou não taxa para o acesso de veículos que não estejam enquadrados nas normas determinadas, conforme aponta o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP, 2022).

De forma geral, veículos mais poluentes como caminhões pesados pagam taxas maiores, enquanto veículos híbridos ou elétricos são isentos, ou tem um desconto para acessar essas zonas. O controle de acesso e a aplicação das taxas é feito através de vídeo monitoramento pelas cidades que possuem a política, gerando arrecadação para o município.

Segundo dados do ITDP, em 2022 havia 320 zonas de baixa emissão em cidades da Europa, com destaque para as principais capitais do continente que possuem há décadas essa política. Londres, por exemplo, possui desde 2008 restrições de acesso a cidade e vem restringindo de forma progressiva a regulação com intuito de despoluir o ar da cidade (EUROPA, 2022).

Figura 44 – Sinalização referente a zona de baixíssima emissão em Londres, Reino Unido



Fonte: ITDP, 2022.

Além da Europa, em anos recentes outros países começaram a aplicar o conceito em suas cidades, com destaque para China, Estados Unidos, Coréia do Sul, Israel e recentemente o Brasil. Em 11 de Julho de 2022, a prefeitura do Rio de Janeiro anunciou que a primeira zona de baixa emissão seria implementada no centro da cidade em uma área de 2,3km<sup>2</sup>. As iniciativas previstas no projeto seriam a implementação de ciclovias, ampliação da área verde, restrição de carros e incentivo ao uso de caminhões elétricos. Para executar o controle, seriam instalados equipamentos de medição da qualidade do ar e de videomonitoramento para fiscalização das normas. (CLIMA E SOCIEDADE, 2022).

Os impactos das zonas de baixa ou zero emissão podem ser observados na bibliografia internacional gerada a partir da análise dos casos de aplicação. Beshir e Fichera (2022) investigam os efeitos na saúde e no bem-estar da Zona de Baixas Emissões (LEZ) da Grande Londres, implementada em 2008, e da Zona de Emissão Ultra Baixa (ULEZ) no centro de Londres, implementada em 2019 e considerada a LEZ mais restritiva do mundo.

A primeira política, aplicada a partir de 2008 levou a redução de 7% nos problemas de saúde limitantes, 4,6% na incidência de problemas de saúde de longo prazo problemas e uma redução de 17% na probabilidade de solicitação de atestados médicos, segundo dados do governo londrino (BESHIR; FICHERA, 2022). O impacto do ULEZ é ainda mais pronunciado, com redução na probabilidade de ter problemas de saúde a longo prazo de 22,5%, número de problemas de saúde 29,8% e licenças médicas 17,7%.

A taxação de emissões por sua vez é outra estratégia para abordar os impactos ambientais significativos associados ao transporte de mercadorias. A literatura destaca a eficácia desse tipo de abordagem como meio para reduzir as emissões de carbono no transporte

de carga. Autores, como Beshir e Fichera (2022), argumentam que a taxaço de emissões pode criar um sistema de incentivos que leva as empresas a investirem em frotas mais eficientes e a adotarem tecnologias de baixa emissão.

Diversas formas de implementa o são possíveis, incluindo a estipula o de tarifas que variam de acordo com o nível de emissões de cada veículo. Essa diferencia o tarifária cria um ambiente propício para a inova o, incentivando a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias mais limpas, como veículos elétricos e híbridos (Smith *et al.*, 2019).

Xu *et al.* (2022) elaboram um método de roteiriza o verde que leva em considera o a política de comércio de carbono chinês (*cap-and-trade policy*), uso de veículos, mão de obra e horários de expedi o.

A política de comércio de carbono chinês concede certas licenças de emissão de carbono às empresas. Se as emissões reais de carbono de uma empresa excedem o seu limite, a empresa deve pagar uma certa taxa para compensar o excesso de emissão de carbono. Por outro lado, se as emissões de carbono da empresa são inferiores ao limite, a empresa pode vender o carbono restante e, assim, obter renda (Xu *et al.*, 2022). Essa lógica permite as empresas levar em considera o como um fator econômico a escolha de frota elétrica, por exemplo, pois apesar de ter um custo inicial maior, o custo em cotas de carbono   inferior e pode compensar no longo prazo.

O mercado de carbono global fornece um mecanismo econômico que incentiva a redu o das emissões de gases de efeito estufa. Diversos países e regiões implementaram esquemas de precifica o de carbono, como taxas e sistemas de *cap-and-trade*, para atribuir um valor monetário às emissões (PETERS *et al.*, 2021). A União Europeia, por exemplo, opera um dos maiores mercados de carbono do mundo, o Sistema de Comércio de Emissões da UE (EU ETS), que tem sido fundamental para estimular a transi o para uma economia de baixo carbono.

Em termos de valores transacionados, o mercado de carbono global tem experimentado um crescimento notável. De acordo com o relatório do Banco Mundial sobre o Estado e Tendências do Mercado de Carbono (2023), o valor total das transa es no mercado de carbono atingiu \$100 bilhões em 2023. Esse aumento reflete tanto a expansão de esquemas existentes quanto a implementa o de novas iniciativas em diversas partes do mundo. Jennifer Sara, diretora para mudanças climáticas do Banco Mundial comenta:

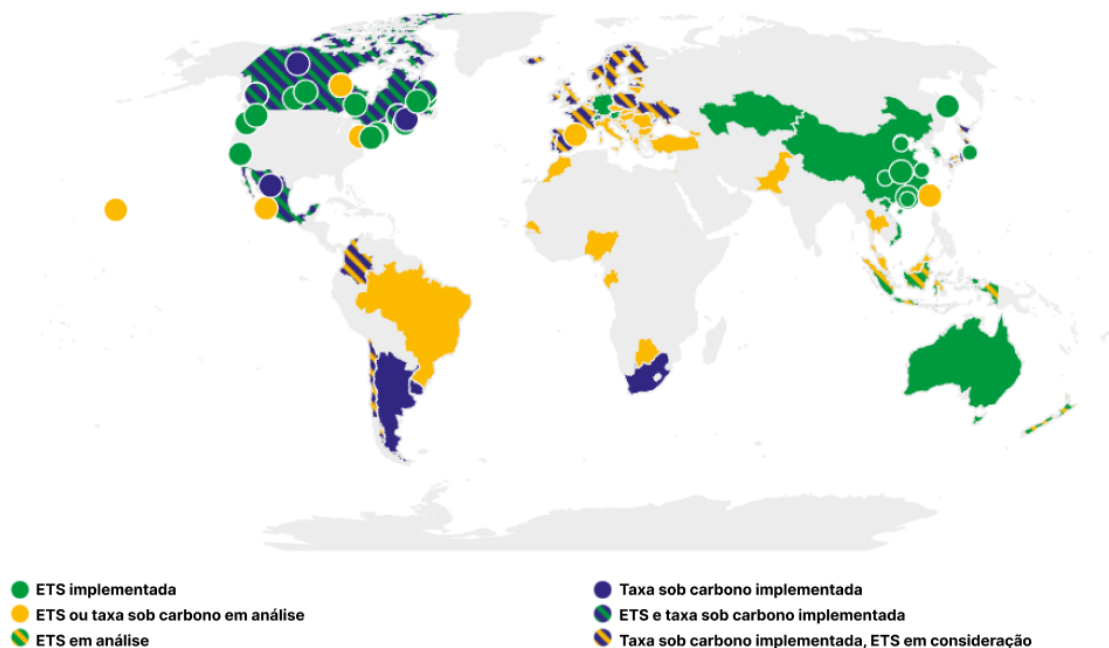
“A fixa o de preços do carbono pode ser uma forma eficaz de incorporar os custos das altera es climáticas na tomada de decisões econ micas, incentivando assim a a o climática. A boa notícia deste relatório   que, mesmo em tempos econ micos

difíceis, os governos estão dando prioridade a políticas diretas de fixação de preços do carbono para reduzir as emissões (MACHADO, 2023).”

Quando o primeiro relatório foi publicado pelo Banco, há uma década, apenas 7% das emissões globais eram cobertas por um imposto sobre o carbono ou por um Regime de Comércio de Licenças de Emissões (RCLE). Hoje, tal como salientado no relatório de 2023, quase um quarto das emissões globais de gases com efeito de estufa (23%) são cobertos por 73 instrumentos de crédito de carbono.

O mapa exibido na Figura 45 demonstra todos os países que possuem alguma iniciativa relacionada a criação de ETSs (*Emission Trade System*) ou “mercado de carbono” ou leis para taxação de carbono. Os países destacados em verde se roxo são aqueles que já possuem regulamentações em vigência, enquanto os em amarelo estão em análise para implementação.

Figura 45 – Países com iniciativas de taxação de carbono



Fonte: Banco Mundial, 2023.

Ao todo, são 73 iniciativas de precificação de carbono já implementadas, 39 regulamentações nacionais encaminhadas e 33 regulamentações subnacionais direcionadas para implementação, o que faz com que 23% das emissões de gases de efeito estufa mundiais estejam sob algum tipo de precificação (Banco Mundial, 2023).

No Brasil, a regulamentação do mercado de carbono ainda está sob análise. De acordo com o Senado Federal (2023), em 04/10/2023 foi aprovado na Comissão de Meio Ambiente o



projeto que regula o mercado brasileiro de redução de emissões. No projeto, a senadora Leila Barros retirou as atividades primárias do setor agrícola do mercado regulado de emissões.

A bancada do agronegócio apontou dificuldades para quantificar as emissões de gases do efeito estufa do setor por serem influenciadas pelo tipo de solo, pelas condições climáticas e pelas práticas de manejo. Apesar disso, a aprovação do mercado de carbono brasileiro tende a ser um avanço para a criação de mais um mecanismo compensador para incentivar o uso de tecnologias menos emissoras em todos os setores da economia, inclusive o de transportes.

Por fim, as restrições de acesso e a taxaço das emissões de carbono são dois mecanismos amplamente explorados em países do exterior que podem ser aplicados ao Brasil, uma vez que sejam criadas regulações nesse sentido no país. Atualmente, levando-se em consideração veículos pesados, as restrições de acesso se restringem apenas a um projeto piloto lançado no Rio de Janeiro e a taxaço de carbono ainda não existe, assim como o mercado de carbono. Em breve, com o avanço dessas iniciativas, ambos critérios poderão se tornar efetivos para consideração em métodos de roteirização verde aplicáveis ao Brasil, porém na data da construção deste trabalho, não são aderentes a realidade brasileira.

#### 4.2.4 OPERAÇÕES LOGÍSTICAS SUSTENTÁVEIS

A eficácia das operações logísticas em qualquer cadeia de suprimentos é indissociável de três elementos cruciais: a janela de entrega, que representa o prazo designado para a entrega de mercadorias, desempenhando um papel crucial na satisfação do cliente e na gestão eficiente do estoque; o atendimento a nível de serviço de entrega, que se refere à capacidade da empresa em cumprir e superar as expectativas do cliente em termos de qualidade e pontualidade; e a logística reversa, um processo cada vez mais relevante na era da sustentabilidade, que trata da gestão eficiente do retorno de produtos e materiais, minimizando o desperdício de recursos.

Laporte *et al.* (2019) abordam as janelas de entrega como critério determinante para a roteirização. No contexto do trabalho, são analisadas em conjunto a possibilidade de recargas parciais para os veículos elétricos que compõem a frota e o atendimento das janelas exigidas pelos clientes. Esse segundo critério, por sua vez, possui maior dependência com o acordo existente entre transportador e cliente do que em relação localidade em que a operação logística transcorre.

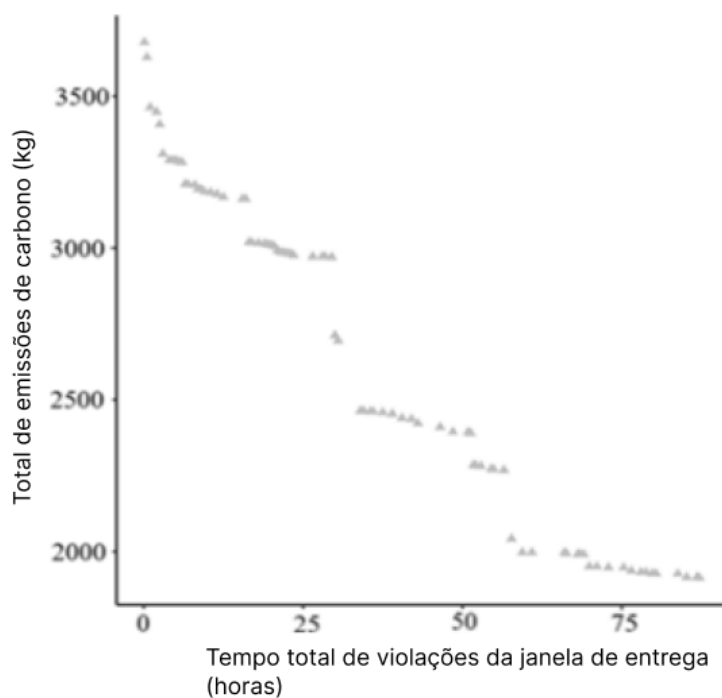
Jolai *et al.* (2016), no seu trabalho, propõe um método de como atender, de forma concomitante, níveis de serviço desejados pelos clientes e critérios ambientais, como por exemplo o nível de emissão dos veículos. Como resultado, é criado um processo decisório

vinculando três variáveis: custo monetário, custo ambiental e nível de serviço. Nesse sentido, a partir da informação inserida no modelo, é possível otimizar um dos critérios e visualizar como os outros dois se comportam, a partir de painéis analíticos.

Os autores concluem que em 95% dos casos analisados melhorar o nível médio de serviço não deteriora os fatores ambientais. Além disso, avaliam que políticas de taxaço sobre o carbono não são suficientes para motivar as cadeias de abastecimento a respeitar o meio ambiente. O imposto avaliado no estudo, por exemplo, representa apenas cerca de 0,5% dos custos totais da logística, muito menos do que os custos com manutenção e mão de obra, sendo algo irrelevante para as tomadas de decisão.

Erdogan e Kabadurmuş (2022) avaliam a relação entre o nível de emissão de uma dada frota e o nível de serviço atingida por ela, na Turquia. Para resolver o problema de emissões de carbono e qualidade de serviço, um método heurístico é desenvolvido para gerar todas as soluções ótimas de Pareto. Conforme o nível de serviço aumenta, as emissões totais de carbono também aumentam. Além disso, à medida que o nível de serviço aumenta, mais Veículos de Combustíveis Alternativos e Estações de Combustíveis Alternativos são utilizados. No gráfico apresentado pelos autores, é demonstrada uma clara relação entre nível de serviço os níveis de emissões, conforme exibido na Figura 46 abaixo.

Figura 46 – Relação entre emissões e nível de serviço de entregas



Fonte: Erdogan e Kabadurmuş, 2022.

Ao analisar quais indicadores que impactam na redução do nível de serviço com a adoção de uma frota menos poluente, é possível afirmar que alguns critérios são impactados pela localidade. A disponibilidade de veículos e infraestrutura de recarga/reabastecimento, por exemplo, pode impactar de forma significativa na manutenção ou redução do nível de serviço da frota. Isso porque, conforme explorado na seção 4.2.1 a existência de um número maior de estações de recarga pode permitir a utilização de frota verde, sem prejuízos.

Da mesma forma, a utilização de veículos com maior autonomia, pode auxiliar na manutenção do nível de serviço. Isso fica evidente na divergência exposta pelos dois trabalhos anteriormente citados, onde o primeiro (JOLAI *et al.*, 2016) afirma que não há redução do nível de serviço no cenário hipotético descrito, ao passo que Erdogan e Kabadurmus (2022) demonstram uma significativa relação entre emissões e atendimento ao nível de serviço, quando avaliado o cenário Turco.

Ghaderi *et al.* (2017) e Rajendran e Madankumar (2016) avaliam em seus trabalhos a aplicação de métodos de roteirização verde considerando a execução rotas de retorno, ou seja, utilização de logística reversa para melhor aproveitamento das viagens. Em ambos os trabalhos, a análise sugere que a utilização da logística reversa produz redução nos custos de distribuição e níveis de emissão. Rajendran e Madankumar (2016) indicam que os resultados do estudo de caso realizado apontam para redução no custo financeiro de 10,5% em relação ao cenário “controle”, sem a execução de logística reversa, bem como uma diminuição de 12,5% nos impactos ambientais gerados pelas viagens.

Em ambos os estudos, todavia, os autores não mencionam a localidade onde as aplicações são feitas, indicando que se trata de cenários fictícios montados especificamente para o desenvolvimento dos estudos, além de não indicarem que quaisquer características regionais implicariam em resultados diferentes.

Por fim, é possível concluir que no contexto das operações logísticas sustentáveis, existe uma relação entre o nível de serviço atingido por uma dada operação logística e seu nível de impacto ambiental. Além disso, essa relação pode variar de acordo com a localidade sob a qual é feita a análise, uma vez que a disponibilidade de infraestrutura verde varia de país para país. Sendo assim, os critérios de nível de serviço e janela de entrega podem sofrer influência da localidade de forma indireta devido a infraestrutura local de recarga, por exemplo.

Por outro lado, a execução da logística reversa não apresenta relação direta com a localidade, uma vez que é um processo definido pela operadora de transporte, com base em sua organização, depósitos e malha de clientes. A escolha de realizar um circuito de retorno cheio

ou vazio não depende de características locais e sim da existência de disponibilidade de mercadoria para execução.

#### 4.3. DIRETRIZES PARA ELABORAÇÃO DE UM MÉTODO DE ROTEIRIZAÇÃO VERDE ADERENTE AO CENÁRIO BRASILEIRO

Levando-se em consideração os critérios de roteirização verde mapeados na seção 4.1 e na análise desenvolvida para cada uma das categorias nas foram classificados (veículos e infraestrutura sustentável, condições locais e restrições ambientais, regulamentações e operações logísticas sustentáveis), é possível elencar deveriam ser utilizados para a construção de um método de roteirização verde no Brasil.

A disponibilidade de frota de veículos verdes e de estações de recarga e/ou reabastecimento são características que podem fazer parte de um método de roteirização verde aplicável ao Brasil. Na seção 4.2.1 onde o assunto foi abordado em detalhes, foram trazidos dados que indicam um forte crescimento da frota de veículos de carga elétricos, bem como a alta disponibilidade de estações de recarga existentes no Brasil, superando inclusive a média mundial.

Em relação as condições locais e a maneira como os critérios dessas categorias são apresentadas nos métodos, também foi possível concluir que os métodos que mencionam tais características (condições climáticas, congestionamento de tráfego e velocidade média de trânsito) podem fazer parte de um método aplicável ao Brasil.

Em relação à categoria de restrições ambientais e regulatórias, não se pode afirmar que são aplicáveis ao Brasil, uma vez que as zonas de baixa emissão e as regulações do mercado de carbono e taxação de emissões ainda não estão estruturadas no país. Apesar de existirem iniciativas nesse sentido, não é possível aplicar esses critérios ao Brasil no atual estágio de maturidade dos temas no país.

Por fim, na análise realizada na seção 4.2.4 a respeito das operações sustentáveis, foi possível concluir que a relação entre atendimento do nível de serviço dos clientes e emissões de poluentes é impactada pela localidade onde é feito o estudo. Nesse sentido, as características de infraestrutura e disponibilidade de frota, por exemplo, podem influenciar na análise e, portanto, são requisitos aplicáveis a realidade brasileira. Por outro lado, a execução de operações de logística reversa não possui relação com a localidade.

O Quadro 7 abaixo resume a avaliação dos critérios mapeados. Na primeira coluna são listados os critérios analisados, agrupados em faixas azuis e brancas de acordo com a

categorização construída na seção 4.2. Na segunda coluna é mencionado se o critério apresenta relação com a localidade onde é aplicado ou não. Na terceira coluna é apontada a conclusão quanto aplicabilidade do critério à realidade brasileira a partir do que foi avaliado na seção 4.1 e, por fim, na quarta coluna é descrito o motivo resumido do critério ser aplicável ao Brasil. Caso o critério não tenha relação com a localidade, o motivo de ser aplicável não é preenchido.

Quadro 7 – Resumo da avaliação de aplicabilidade dos critérios de roteirização verde

<b>Critério</b>	<b>Relação com a localidade?</b>	<b>Aplicável à realidade brasileira?</b>	<b>Motivo</b>
Disponibilidade de veículos verdes	Sim	Sim	Disponibilidade crescente de frota verde
Disponibilidade de estações de recarga de bateria e reabastecimento	Sim		Disponibilidade de estações de recarga
Eficiência dos veículos	Não		-
Nível de emissão de ruído	Não		-
Condições climáticas	Sim	Sim	Disponibilidade de acesso às informações
Congestionamento de tráfego	Sim		Disponibilidade de acesso às informações
Velocidade média	Sim		Disponibilidade de acesso às informações
Restrições de acesso	Sim	Não	Inexistência de zonas de restrições de acesso relevantes
Taxação de emissões	Sim		Inexistência de legislação
Janela de entrega	Sim	Sim	Disponibilidade de estações de recarga
Nível de serviço	Sim		Disponibilidade de estações de recarga
Logística reversa	Não		-

Fonte: elaborado pelo autor, 2023.

Dos 12 critérios mencionados, 10 são considerados aplicáveis a realidade brasileira, sendo que 7 possuem relação com a localidade de aplicação, enquanto 3 não. Além disso, 2 não são aplicáveis à realidade brasileira porque o Brasil não dispõe dos requisitos de aplicação desses (restrições de acesso e legislação sob emissões).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Diante da complexidade e urgência das questões ambientais associadas ao setor de transportes, que corresponde globalmente por 24% das emissões de CO<sub>2</sub> (IEA, 2019), esta pesquisa buscou compreender os impactos ambientais gerados por essa indústria, tanto em âmbito nacional quanto internacional. A análise revelou a relevância do setor, evidenciando a necessidade de estratégias eficazes para mitigar os impactos gerados pelo transporte no meio ambiente. Foi possível ratificar também que quando comparado ao restante do mundo, o Brasil destaca-se pelos baixos níveis globais de emissão e por uma menor proporção de emissões relacionadas aos transportes.

Através da fundamentação teórica e da revisão sistemática elaboradas nos capítulos 2 e 3, foi possível entender em detalhes como o setor de transportes representa nos níveis globais e locais de emissões, assim como compreender como a roteirização tradicional e a roteirização verde podem apoiar para mitigar esse impacto. Ao se avaliar um universo de 3.160 trabalhos científicos sobre o tema, obtidos em 4 diferentes plataformas, chegou-se a uma base final de 29 artigos, escritos em 19 diferentes países. A base final permitiu a criação de uma lista de 12 critérios chave que baseiam os métodos de roteirização verde na literatura internacional, os quais foram classificados em 4 grupos com base em suas características e relevância. Com isso, os objetivos específicos “a”, “b” e “c” do trabalho puderam ser atendidos de forma satisfatória, por meio da documentação construída.

A partir disso, os critérios mapeados e categorizados foram explorados em detalhes quanto a sua relação com a localidade de aplicação. Nesse sentido, foram analisadas as relações com a localidade citada dentro do próprio trabalho original de publicação, bem como outros países e, principalmente, ao Brasil. Dessa forma, o objetivo específico “d” pode ser atendido. Os itens relacionados aos veículos verdes e infraestrutura sustentável, condições locais e operações logísticas sustentáveis foram avaliados como aplicáveis a realidade brasileira, a partir do estudo apresentado na seção 4.2. As características dos critérios quando vinculadas ao Brasil permitem que os métodos sejam utilizados, considerando a disponibilidade de infraestrutura, frota e demais informações requeridas.

Por outro lado, os critérios relacionados às restrições de acesso e regulamentação não são aderentes a realidade brasileira, pois conforme exposto na seção 4.2.4 o país não dispõe de mecanismos legais necessários para aplicação dos métodos que fazem uso desses fatores. As zonas de baixa emissão, bem como as leis de taxação sob emissões não existem no Brasil, diferente dos países Europeus e Asiáticos mencionados na seção.

Com base nessas conclusões, foi possível a construção das “Diretrizes para elaboração de um método de roteirização verde aderente ao cenário brasileiro”, conforme descrito na seção 4.3 e atingir o quinto objetivo específico proposto no capítulo inicial. Além disso, foi possível responder à pergunta da pesquisa formulada no começo do trabalho.

Ademais de responder as questões formuladas na proposição inicial do trabalho, alguns temas evoluíram ao longo do período de construção dessa dissertação (entre 2021 e 2024) podem ser mencionadas. A evolução da presença de veículos elétricos no Brasil e no Mundo foi notável, o que indica uma forte tendência de eletrificação da frota de passeio e, por consequência, uma evolução na construção de infraestrutura para utilização desses veículos. Esse fator pode, no médio prazo, permitir o avanço do uso de veículos de carga elétricos, que atualmente são muito limitados em sua autonomia devido à falta de estações de recarga.

Os conceitos de Zona de Baixa Emissão e a taxação de emissões foram dois temas que surgiram nos artigos pesquisados e, conforme os dados apresentados, demonstraram ser efetivos na redução das emissões. Porém, como comentado, o Brasil carece de legislação madura para tratar dos temas. De todo modo, iniciativas recentes do Governo Federal apontam no caminho de aumentar os impostos sob produtos que possuem maior impacto no meio ambiente e incentivar aqueles que apresentam selo “verde”, o que indica que no curto/médio prazo esses conceitos podem ser aplicados nos estudos de roteirização verde para o Brasil.

Por outro lado, em termos globais, eventos geopolíticos recentes como a Guerra na Ucrânia (2022- até o momento) e o aumento das tensões no Oriente Médio (2023- até o momento) representaram uma mudança de rumo no desenvolvimento global, com a volta da formação de blocos de alianças globais, similares aos vistos na Guerra Fria. Com isso, de certa forma, a pauta ambiental fora deixada em segundo plano e muita atenção foi deslocada para a urgência desses conflitos armados de grande escala.

A globalização vista nas últimas décadas deu lugar ao “nearshore” e ao “friend-shore”, conceitos relacionados a um desenvolvimento alinhado com as semelhanças políticas e proximidade dos países (Baschuk, 2023). Os impactos dessas mudanças são diversos e podem, por exemplo, impactar no avanço da pauta ambiental. Com o conflito Rússia/Ucrânia, por exemplo, o preço da energia na Europa subiu de forma significativa, reduzindo a competitividade do carro elétrico. Além disso, países como França e Alemanha passaram a investir mais em aparato militar e reduziram os incentivos fiscais existentes para compra de carro elétrico, evidente exemplo da mudança de prioridade do momento (Reuters, 2024, Rogers, 2024).

De toda forma, os impactos sentidos pelas pessoas em função das mudanças climáticas não deixarão de existir. Sendo assim, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias que visam mitigar os níveis de emissões e reduzir a poluição local e global seguirão relevantes para o futuro.

#### 5.1. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Proposição de um método de roteirização verde a partir dos critérios aderentes a realidade brasileira, a partir das diretrizes elaboradas na seção 4.3;
- Avaliação de possíveis zonas de baixa emissão em regiões metropolitanas das principais cidades brasileira como forma de mitigar as emissões nos grandes centros urbanos e reduzir a poluição localizada, conforme observado em diversos países na seção 4.2.3;
- Criação de uma base centralizada de estações de recarga de veículos elétricos, com o detalhamento do tipo, indicando a possibilidade ou não de recarga de veículos pesados;
- Avaliação de legislação de incentivo ao uso de veículos pesados verdes, através de descontos em impostos para compra e manutenção de frota, bem como em taxação de emissões para veículos poluentes.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABVE. **IPVA - para veículos elétricos**. 2017. Disponível em: <https://www.abve.org.br/ipva-para-veiculos-eletricos/> . Acesso em 20/10/2023.
- ACEA. Associação Europeia de Fabricantes de Automóveis. (2022). **Overview of Electric Vehicles: Tax Benefits and Purchase Incentives in the European Union**. Recuperado de <https://www.acea.auto/fact/overview-electric-vehicles-tax-benefits-purchase-incentives-in-the-european-union-2022/>. Acesso em 23/10/2023.
- ACCESS MAGAZINE. **Traffic Congestion and Greenhouse Gases**. Access Magazine , 2009. Disponível em: <https://www.accessmagazine.org/fall-2009/traffic-congestion-greenhouse-gases/> . Acesso em: 25/10/2023.
- ALVARENGA, Henrique. Matriz de transportes do Brasil à espera dos investimentos. Publicado em 21/08/2020. In Home, Publicações, Insights. Disponível em: <https://ilos.com.br/matriz-de-transportes-do-brasil-a-espera-dos-investimentos/> . Acesso em: 20/11/2023.
- ASGHARI, Mohammad; AL-E-HASHEM, S. Mohammad J. Mirzapour. **Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review**. International Journal of Production Economics, v. 231, p. 107899, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/am/pii/S0925527320302607>. Acesso em: 25/07/2023.
- APPLEGATE, D. L.; BIXBY, R. E.; CHVATAL, V.; COOK, W. J. **The Traveling Salesman Problem: A Computational Study**. Princeton University Press, 2007. Disponível em: <https://www.math.uwaterloo.ca/~bico/papers/tspcomplexity.pdf>. Acesso em 14/03/2023.
- ASSAF, Eliane Moreira; SAID, Suzana Borschiver. **Tecnologias e alternativas para redução da emissão de poluentes atmosféricos em motores de combustão interna**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 22, n. 5, p. 307-315, 2018. Disponível em: <https://www.agriambi.com.br/> . Acesso em 10/05/2023.
- BASCHUK, B. **What ‘Friend-Shoring’ Means for the Future of Trade**. *Bloomberg*, 11 set. 2023, 15:49 BRT. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2023-09-11/-friend-shoring-is-a-us-trade-policy-that-s-good-news-for-india-vietnam?embedded-checkout=true> . Acesso em: 11 set. 2023.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística** Empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006 Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=QAHrq0r6E7cC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Gerenciamento+da+Cadeia+de+Suprimentos/Log%C3%ADstica+&ots=kfNW2\\_19rl&sig=PYXYQo7cwBEwyNZkSmY9fRuVUWQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Gerenciamento%20da%20Cadeia%20de%20Suprimentos%2FLog%C3%ADstica&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=QAHrq0r6E7cC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Gerenciamento+da+Cadeia+de+Suprimentos/Log%C3%ADstica+&ots=kfNW2_19rl&sig=PYXYQo7cwBEwyNZkSmY9fRuVUWQ&redir_esc=y#v=onepage&q=Gerenciamento%20da%20Cadeia%20de%20Suprimentos%2FLog%C3%ADstica&f=false). Acesso em 01/06/2023.

BANCO MUNDIAL. **Transporte global e infraestrutura: a perspectiva do Banco Mundial**. Washington, DC: Banco Mundial, 2021. Disponível em: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/35767>. Acesso em: 25 fev. 2023

BANCO MUNDIAL. **Carbon Pricing Dashboard**. Disponível em: <https://carbonpricingdashboard.worldbank.org>. Acesso em: 30/10/2023.

BARTHOLOMEU, Daniela Bacchi; PÉRA, Thiago Guilherme; CAIXETA-FILHO, José Vicente. **Logística sustentável: avaliação de estratégias de redução das emissões de CO2 no transporte rodoviário de cargas**. Journal of Transport Literature, v. 10, p. 15-19, 2016. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jtl/a/hmCRKy5mgYswyFvrKRCTzvG/>. Acesso em: 30/07/2023.

BESHIR, Habatamu Ali; FICHERA, Eleonora. **And Breathe Normally: The Low Emission Zone impacts on health and well-being in England**. Universidade de York, Reino Unido, 2022. Disponível em: <https://www.york.ac.uk/media/economics/documents/hedg/workingpapers/2022/2209.pdf>. Acesso em: 20/07/2023.

BONDY, J. A.; MURTY, U. S. R. **Graph theory with applications**. American Elsevier Publishing Company, 2008. Disponível em: <https://www.iro.umontreal.ca/~hahn/IFT3545/GTWA.pdf>. Acesso em: 20/07/2023.

BRASIL. Ministério da Economia. **Retomada de tributação para veículos eletrificados é oficializada pelo DOU. Volta de imposto de importação sobre carros híbridos, híbridos plug-in e elétricos será gradual a partir de janeiro de 2024**. Agência Brasil, 2023a. Disponível em: <https://www.gov.br/mdic/pt-br/assuntos/noticias/2023/novembro/retomada-de-tributacao-para-veiculos-eletrificados-e-oficializada-pelo-dou>. Acesso em: 10/01/2024.

\_\_\_\_\_. Mover: **Governo Federal lança programa de Mobilidade Verde e Inovação. Programa vai reduzir imposto de quem polui menos, aumentar exigências de**

sustentabilidade, expandir investimentos em eficiência energética e incluir limites mínimos de reciclagem na fabricação dos veículos. Agência Brasil, 2023b. Disponível em: <https://agenciagov.etc.com.br/noticias/202312/mover-programa-de-mobilidade-verde-e-lancado>. Acesso em: 20/01/2024.

\_\_\_\_\_. **COP26: Brasil promete reduzir emissões de gases pela metade até 2030**. Agência Brasil, 2021. Disponível em <https://agenciabrasil.etc.com.br/geral/noticia/2021-11/cop26-brasil-promete-reduzir-emissoes-de-gases-pela-metade-ate-2030#>. Acesso em: 07/01/2024.

\_\_\_\_\_. **Lei das Ferrovias, 2021**. PL 3754/2021 (Nº Anterior: PLS 261/2018) Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=2304326>. Acesso em: 16/09/2023.

\_\_\_\_\_. **Altera as alíquotas do Imposto sobre Produtos Industrializados - IPI incidente sobre veículos equipados com motores híbridos e elétricos, 2018**. Disponível em: <https://legis.senado.leg.br/norma/27431598>. Acesso em: 19/10/2023.

\_\_\_\_\_. **Portaria 97/2015, redução do Imposto de Importação para os veículos elétricos, 2015**. Disponível em <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=27/10/2015&jornal=1&pagina=1&totalArquivos=76>. Acesso em: 20/08/2023.

BAUER, Gordon; ZHENG, Cheng; GREENBLATT, Jeffery Buyers; SHAHEEN, Susan; KAMMEM, Daniel. *On-demand automotive fleet electrification can catalyze global transportation decarbonization and smart urban mobility*. Environmental science & technology, v. 54, n. 12, p. 7027-7033, 2020. Disponível em <https://rael.berkeley.edu/wp-content/uploads/2020/05/Bauer-Zheng-Greenblatt-ShaheenKammen-EST-2020-FleetElectrification-.pdf>. Acesso em: 11/06/2023.

BEKTAS, Tolga; LAPORTE, Gilbert. *The pollution-routing problem*. Transportation Research Part B, v. 45, p. 1232-1250, 2011. Disponível em <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019126151100018X>. Acesso em: 11/06/2022.

BRIZOLA, Jairo; FANTIN, Nádia. **Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura**. Revista de Educação do Vale do Arinos-RELVA, v. 3, n. 2, 2016. Disponível em <https://periodicos.unemat.br/index.php/relva/article/view/1738>. Acesso em: 05/04/2022.

CEBDS, Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável – (2021). **Proposta de Marco Regulatório para o Mercado de Carbono Brasileiro**. Disponível em: <https://cebds.org/wpcontent/uploads/2021/08/cebds.org-mercado-de-carbono-marco-regulatorio-mercado-carbono-marco-regulatorio-sem-olhos.pdf>. Acesso em: 15/12/2021.

CETESB, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Emissões no setor de energia: subsetor de transportes**. Relatório de referência, 418p, 2014. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/09/emissoes-no-setor-de-energia\\_Transportes.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/inventario-gee-sp/wp-content/uploads/sites/34/2014/09/emissoes-no-setor-de-energia_Transportes.pdf). Acesso em: 15/10/2021.

CHINA, *China's Mid-Century Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy1, 2021*. Disponível em: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/China's%20Mid-Century%20Long-Term%20Low%20Greenhouse%20Gas%20Emission%20Development%20Strategy.pdf>. Acesso em: 15/10/2021.

CLIMA E SOCIEDADE. *The Center of Rio de Janeiro will be the first Low Emission District in the country*. Disponível em: <https://climaesociedade.org/en/the-center-of-rio-de-janeiro-will-be-the-first-low-emission-district-in-the-country/>. Acesso em: 30/10/2023.

CNT, Confederação Nacional de Transportes. **Anuário de transportes, 2021**. Disponível em <https://anuariodotransporte.cnt.org.br/2021/File/PrincipaisDados.pdf>. Acesso em: 20/11/2022.

CNT, Confederação Nacional de Transportes. **Transporte em números: setor contribui para a geração de empregos, 2019**. Disponível em <https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/transporte-numeros-setor-contribui-geracao-empregos>. Acesso em: 20/11/2022.

COLAVITE, Alessandro Serrano; KONISHI, Fabio. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade**. Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, v. 12, p. 28, 2015. Disponível em <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos15/802267.pdf>. Acesso em: 20/11/2021.

CORBERÁN, Ángel; EGGLESE, Richard; HASLE, Geir; PLANA, Isaac; SANCHIS, José María. *Arc routing problems: A review of the past, present, and future*. Networks, v. 77, n. 1, p. 88-115, 2021. Disponível em <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/net.21965>. Acesso em: 20/11/2023.

CORDEIRO, Alexander Magno; OLIVEIRA, Glória Maria; RENTERÍA, Juan Miguel; GUIMARÃES, Carlos Alberto. **Revisão sistemática: uma revisão narrativa. Revista do colégio brasileiro de cirurgiões**, v. 34, p. 428-431, 2007. Disponível em <https://www.scielo.br/j/rcbc/a/CC6NRNtP3dKLgLPwcmV6Gf/?lang=pt#>. Acesso em: 20/08/2023.

DA SILVA, Geilson Rodrigues; ERROBIDART, Nádia Cristina Guimarães. **Termodinâmica e Revolução industrial: Uma abordagem por meio da História Cultural da Ciência**. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, v. 19, p. 71-97, 2019. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/hcensino/article/view/41758>. Acesso em: 23/10/2023.

Department of Energy (DOE). **DOE Projects: Zero Emissions Medium and Heavy-Duty Electric Trucks Will Be Cheaper than Diesel**. Disponível em: <https://www.energy.gov/articles/doe-projects-zero-emissions-medium-and-heavy-duty-electric-trucks-will-be-cheaper-diesel>. Acesso em: 23/10/2023.

DEUTEN, Sebastiaan; VILCHEZ, Jonatan J. Gómez; THIEL, Christian. **Analysis and testing of electric car incentive scenarios in the Netherlands and Norway**. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 151, p. 119847, 2020.

DREHMER, Vitória; VILLAÇA, Thais. **Venda de carros eletrificados cresce 41% no Brasil e frota ultrapassa os 126 mil em 2022**. Publicado em 15/01/2023. Disponível em: <https://autoesporte.globo.com/eletricos-e-hibridos/noticia/2023/01/venda-de-carros-eletrificados-cresce-41percent-no-brasil-e-frota-ultrapassa-os-126-mil-em-2022.ghtml>. Acesso em: 20/12/2023.

Observatório do Clima. **Análise das emissões brasileiras de e suas implicações para as metas climáticas do Brasil 1970 – 2020**. Brasil. Disponível em: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjbu4fEuOj6AhX5q5UCHdLLC6gQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fseeg-br.s3.amazonaws.com%2FDocumentos%2520Analiticos%2FSEEG\\_9%2FOC\\_03\\_relatorio\\_2021\\_FINAL.pdf&usg=AOvVaw1GPIJZi3aOIozNFQW\\_Kjrv](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjbu4fEuOj6AhX5q5UCHdLLC6gQFnoECAwQAQ&url=https%3A%2F%2Fseeg-br.s3.amazonaws.com%2FDocumentos%2520Analiticos%2FSEEG_9%2FOC_03_relatorio_2021_FINAL.pdf&usg=AOvVaw1GPIJZi3aOIozNFQW_Kjrv), 2022.

EKSIOGLU, Burak; VURAL, Arif Volkan; REISMAN, Arnold. *The vehicle routing problem: A taxonomic review*. Computers & Industrial Engineering, v. 57, n. 4, p. 1472-1483, 2009.

ELSHAER, Raafat; AWAD, Hadeer. *A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants*. Computers & Industrial Engineering, v. 140, p. 106242, 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balço energético nacional 2016: Ano base 2015**. 2016. 62 p. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relat%C3%B3rio%20Final%202016.pdf>. Acesso em 28/07/2017.

EPRS (European Parliamentary Research Service). *CO2 emission standards for new cars and vans, PE 698.920*, Acesso em: 10/07/2022.

Estadão. **Brasil chega a 3.200 eletropostos de recarga**. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/inovacao/brasil-chega-a-3-200-eletropostos-de-recarga/>. Acesso em: 23/10/2023.

Estadão. **Brasil ruma para a eletrificação completa dos veículos de carga**. Recuperado de <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/brasil-ruma-para-a-eletrificacao-completa-dos-veiculos-de-carga/> . Acesso em 23/10/2023.

EUROPA, 2022. *Low Emission Zone*. Disponível em: [https://data.europa.eu/data/datasets/low\\_emission\\_zone?locale=pt](https://data.europa.eu/data/datasets/low_emission_zone?locale=pt). Acesso em: 30/10/2023.

STEBAN ORTIZ-OSPINA; BELTEKIAN, Diana; ROSER, Max. *Trade and Globalization*. Our World in Data, 2018. Disponível em: <https://ourworldindata.org/trade-and-globalization>. Acesso em 25/05/2023.

FAGERHOLT, K.; LAPORTE, G.; NORSTAD, I. *Reducing fuel emissions by optimizing speed on shipping routes*. Journal of the Operational Research Society, v. 61, p. 523-529, 2010.

GIL, Antônio Carlos. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999. Disponível em: <https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9nicas-de-pesquisa-social.pdf>. Acesso em 20/10/2023.

GUPTA, Ms Yuvika. *Carbon credit: a step towards green environment*. Global Journal of Management and Business Research, v. 11, n. 5, 2011.

HANAKI, Keisuke; PORTUGAL-PEREIRA, Joana. *These effect of biofuel production on greenhouse gas emission reductions*. In: *Biofuels and sustainability*. Springer, Tokyo, 2018. p. 53-71.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. Cochrane *Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. John Wiley & Sons, 2011.

HISTORICAL TRANSPORTATION DYNAMICS AND GLOBALIZATION NETWORKS. *Globalization and the Evolution of the Transport Sector, 1800-2050*. Groningen: University of Groningen, 2015. Disponível em: [https://www.rug.nl/research/portal/en/publications/globalization-and-the-evolution-of-the-transport-sector-18002050\(62b607ae-a1fc-4617-9ebd-92d120c906e8\).html](https://www.rug.nl/research/portal/en/publications/globalization-and-the-evolution-of-the-transport-sector-18002050(62b607ae-a1fc-4617-9ebd-92d120c906e8).html). Acesso em 24/02/2023.

HERRENDORF, Berthold; ROGERSON, Richard; VALENTINYI, Akos. *Growth and structural transformation*. Handbook of economic growth, v. 2, p. 855-941, 2014.

IEA (Internacional Energy Agency). *Database documentation Greenhouse Gas Emissions from Energy 2021 Edition*, p. 1-105, 2021. Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-browser?country=WORLD&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySector>

IEA, *Transport sector CO2 emissions by mode in the Sustainable Development Scenario, 2000-2030, IEA, Paris, 2022*. Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/transport-sector-co2-emissions-by-mode-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030>. Acesso em 10/01/2023.

IEA, *World Energy Balances, 2021 Edition*, 2021. Disponível em <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-products?filter=balances%2Fstatistics>

IEA, *Electric truck registrations and sales share by region, 2015-2022*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/electric-truck-registrations-and-sales-share-by-region-2015-2022>. Licence: CC BY 4.0. Acesso em 23/10/2023.

IEA, *Global EV Outlook 2023*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023>. License: CC BY 4.0. Acesso em 23/10/2023.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY - ITDP,. *What is a Low Emission Zone?*. Disponível em: <https://www.itdp.org/2023/02/22/what-is-a-low-emission-zone/>. Acesso em: 30/10/2023.

JARDIM, P. L.; MELO, M. C. *The Brazilian logistics sector and its environmental impacts*. Environmental Science & Policy, v. 88, p. 83-91, 2018.

J BAUER; T BEKTAŞ; T G CRAINIC. *Minimizing greenhouse gas emissions in intermodal freight transport: an application to rail service design*. Journal of the Operational Research Society, v. 61, n. 3, p. 530-542, 2010. DOI: 10.1057/jors.2009.102.

JUNIOR, José Mascarenhas. **Roteirização por Software x Roteirização Convencional**. LALT - LABORATÓRIO DE APRENDIZAGEM EM LOGÍSTICA E TRANSPORTES. Disponível em: <http://lalt.fec.unicamp.br/wp-content/uploads/2020/07/tcc-34.pdf>. Acesso em, v. 25, 2021.

KOLMETZ, S.; BATARBUTAR, P.; VROLIJK, C. *Project Developer Engagement with the VCM*. VCM Global Dialogue, 2021. Disponível em: <https://vcm-gd.org/wp-content/uploads/2021/09/20210926-VCMGD-Project-developers.pdf>. Acesso em 25/02/2023.

KONSTANTAKOPOULOS, Grigorios D.; GAYIALIS, Sotiris P.; KECHAGIAS, Evripidis P. *Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: A literature review and classification*. Operational research, v. 22, n. 3, p. 2033-2062, 2022.

LIN, Canhong et al. *Survey of green vehicle routing problem: past and future trends*. Expert systems with applications, v. 41, n. 4, p. 1118-1138, 2014.

LINDSTAD, Haakon; ASBJØRNSLETT, Bjørn E.; STRØMMAN, Anders H. *Reductions in greenhouse gas emissions and cost by shipping at lower speeds*. Energy policy, v. 39, n. 6, p. 3456-3464, 2011.

LUCENA, Matheus; LUCIANO, Thaina; DARONCHO, Celio. **As Vantagens da roteirização de cargas, 2020**. Desafios da inovação na nova economia e na sociedade do conhecimento - São Paulo, Brasil, 2020. Acesso em: 12/06/2023.

MACHADO, Nayara. **Precificação do carbono rendeu quase US\$ 100 bi em receitas em 2022, aponta Banco Mundial**. Publicado em 24 de maio de 2023. Em Clima, Internacional, Meio ambiente, Mercados. Disponível em: <https://epbr.com.br/precificacao-do-carbono->



[rendeu-quase-us-100-bi-em-receitas-em-2022-aponta-banco-mundial/](#). Acesso em: 20/10/2023.

MAGALHÃES, L. G.; MARINS, F. A. S. *Green logistics in Brazil: A systematic literature review*. Journal of Cleaner Production, v. 112, p. 3043-3054, 2016.

MARTIN, Scott C. *World Historical Timeline: Transport*. In: WORLD HISTORY ENCYCLOPEDIA, vol. 17, p. 47-49, 2011.

MEERSMAN, Hilde; VAN DE VOORDE, Eddy. *The relationship between economic activity and freight transport*. In: Freight transport modelling. Emerald Group Publishing Limited, 2013.

MENDES, J. C. S.; HAN, L. *Sustainable urban logistics in Brazil: The role of freight transport demand management*. Journal of Cleaner Production, v. 227, p. 946-956, 2019.

MONTAGNA, Joseph A. *The industrial revolution*. Yale-New Haven Teachers Institute, 1981. Acesso em: 05/07/2023.

MONTOYA, Alejandro et al. *A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 70, p. 113-128, 2016. Acesso em: 05/06/2023.

NEW ZEALAND MINISTRY OF TRANSPORT (NZMT). *Green Freight Strategic Working Paper, 2020*. Disponível em: [https://www.transport.govt.nz/assets/Uploads/Paper/Green-Freight-Strategic-Working-Paper\\_FINAL-May-2020.pdf](https://www.transport.govt.nz/assets/Uploads/Paper/Green-Freight-Strategic-Working-Paper_FINAL-May-2020.pdf). Acesso em: 10/05/2023.

NOVAES, Antônio Galvão. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição: Estratégia, Operação e Avaliação**. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.

OLIVEIRA, Alan Duarte de. **Análise da utilização de métodos de roteirização de transportes**. 2014. 69 f. TCC (graduação em Administração) - Universidade Federal do Ceará, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Fortaleza-CE, 2014.

OUR WORLD IN DATA. *Share of global cumulative CO2 emissions*, 2022. Disponível em: <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-cumulative-co2?country=USA~CHN~IND~European+Union+%2827%29~BRA~RUS~JPN>

\_\_\_\_\_ . **Total greenhouse gas emissions, 2022.** Disponível em:  
<https://ourworldindata.org/explorers/co2?facet=none&country=CHN~USA~IND~Europe~JPN~BRA~RUS&Gas=All+GHGs+%28CO2eq%29&Accounting=Production-based&Fuel=Total&Count=Per+country&Relative+to+world+total=false>.

\_\_\_\_\_ . **Per capita greenhouse gas emissions, 2022.** Disponível em:  
<https://ourworldindata.org/explorers/co2?facet=none&country=CHN~USA~IND~Europe~JPN~BRA~RUS&Gas=All+GHGs+%28CO2eq%29&Accounting=Production-based&Fuel=Total&Count=Per+capita&Relative+to+world+total=false>.

PELTOKOSKI, Merja; LOHTANDER, Mika; VOLOTINEN, Jarno. **Location Independent Manufacturing—Manufacturing company competitiveness in a changing business environment.** In: Proceedings of the 7th International Swedish Production Symposium. 2016. p. 1-9. Acesso em: 11/07/2023.

PINHEIRO, Renata; SOUSA, Natália; MORAIS, Roberto. **Distribuição de carga fracionada: comparativo entre o uso de modelos teóricos e de um software de roteirização.** 2016. South American Development Society Journal, Vol. 2, nº 5, 2016.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico.** 2a ed. Novo Hamburgo: Editora Feevale, 2013. 276 p. Disponível em: [http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book Metodologia do Trabalho Cientifico.pdf](http://www.feevale.br/Comum/midias/8807f05a-14d0-4d5b-b1ad-1538f3aef538/E-book%20Metodologia%20do%20Trabalho%20Cientifico.pdf). Acesso em: 2 nov. 2020.

QUINTINO, Larissa. **Venda de carros elétricos dobra no Brasil em 2023 e bate recorde.** Veja. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/venda-de-carros-eletricos-dobra-no-brasil-em-2023-e-bate-recorde>. Acesso em: 20/01/2024.

RAMOS, Andrea. **Venda de caminhões cai 16% em 2023; Volvo FH é líder há 11 anos.** Publicado em 04 de janeiro de 2024. Disponível em: <https://estradao.estadao.com.br/caminhoes/venda-de-caminhoes-cai-16-em-2023-volvo-fh-e-lider-ha-11-anos/>. Acesso em: 20/01/2024.

RAVAGNOLLI, L. L. **Roteirizadores para operadores logísticos: definição e apresentação.** Centro Paula Souza, Jaú. 2º Sem. de 2006. p 86. Acesso em: 20/04/2023.

RAȚIU, Sorin. **The history of the internal combustion engine.** Annals of the faculty of engineering Hunedoara, p. 145-148, 2003.

REUTERS. *France cuts EV subsidy for higher-income buyers*. [S.l.], 13 fev. 2024.

Disponível em: <https://www.reuters.com/> . Acesso em: 13 fev. 2024.

RODIONOVA, Margarita V. et al. *Biofuel production: challenges and opportunities*. International Journal of Hydrogen Energy, v. 42, n. 12, p. 8450-8461, 2017.

ROGERS, I. *Germany Says Its Defense Spending Could Increase to 3.5% of GDP*.

Bloomberg, 17 fev. 2024, 12:37 BRT. Disponível em:

<https://www.bloomberg.com/news/articles/2024-02-17/germany-says-its-defense-spending-could-increase-to-3-5-of-gdp?embedded-checkout=true>. Acesso em: 17 fev. 2024.

SAKURAI, Ruudi; ZUCHI, Jederson Donizete. *As revoluções industriais até a indústria 4.0*. Revista Interface Tecnológica, v. 15, n. 2, p. 480-491, 2018.

SCHIFFER, M.; SCHLAG, B. *Urban mobility and energy consumption: The case of Germany and Switzerland*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, v. 44, n. 9, p. 744-761, 2010. Acesso em: 01/04/2023.

SCHOLAR, Gurpreet Singh-Ph D.; SINGH, Dr Jatinder. *Review Study of Multi Depot Vehicle Routing Problem and Path Optimization Methods*, 2019.

SMITH, A.; RIBEIRO, S. K.; MILLARD-BALL, A. *Managing the transition to electric vehicles: Lessons from the introduction of the horseless carriage*. Energy Policy, v. 129, p. 436-442, 2019.

TAN, S.-Y.; YEH, W.-C. *The Vehicle Routing Problem: State-of-the-Art Classification and Review*. Applied Sciences, v. 11, n. 21, p. 10295, 2021.

<https://doi.org/10.3390/app112110295>.

TOTH, P.; VIGO, D. *The Vehicle Routing Problem: Latest Advances and New Challenges*. Springer, 2014.

US DEPARTMENT OF ENERGY. *Fuel economy guide, 2008*. Disponível em:

<http://www.fueleconomy.gov>. Acesso em 25/02/2023.

United States Environmental Protection Agency (EPA). *Effects of Speed on Fuel Economy and CO2 Emissions in Highways*. Disponível em: <https://encurtador.com.br/pqCZ0>. Acesso em: 28 out. 2023.

VIANNA, Guilherme Szczerbacki Besserman; YOUNG, Carlos Eduardo Frickmann. Em busca do tempo perdido: uma estimativa do produto perdido em trânsito no Brasil. **Revista de Economia Contemporânea**, v. 19, p. 403-416, 2015.

ZIEGLER, Micah S.; TRANCIK, Jessika E. *Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline*. Energy & Environmental Science, v. 14, n. 4, p. 1635-1651, 2021.

ZHANG, Junfeng Jim; SAMET, Jonathan M. *Chinese haze versus Western smog: lessons learned*. Journal of Thoracic Disease, v. 7, n. 1, p. 3, 2015. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4311077/>. Acesso em: 20/11/2023.

ZHANG, Runsen; FUJIMORI, Shinichiro. *The role of transport electrification in global climate change mitigation scenarios*. Environmental Research Letters, 2020.

WANG, Heng et al. **Heterogeneous Fleets for Green Vehicle Routing Problem With Traffic Restrictions**. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, v. 24, n. 8, agosto de 2023.

WANG, Jin et al. **A Hybrid Genetic Algorithm for Multi-Trip Green Capacitated Arc Routing Problem in the Scope of Urban Services**. Nome do Periódico ou Evento, Local de Publicação, volume, número, páginas, mês e ano de publicação. DOI: 10.3390/su10051366. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/yu2zdt25q5hzbpnqvgxuxm6fie/access/wayback/https://dergi.park.org.tr/tr/download/article-file/831740>. Acesso em: 10/10/2023.