

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE CIÊNCIAS E ENGENHARIA

Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento

ANA CAROLINA DA ANGELA GUASTALI

**ANÁLISE DE GASES POLUENTES E ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS EM UMA
EMPRESA DO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO AGRÍCOLA**

TUPÃ

2025

ANA CAROLINA DA ANGELA GUASTALI

**ANÁLISE DE GASES POLUENTES E ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS EM UMA
EMPRESA DO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO AGRÍCOLA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronegócio e Desenvolvimento da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Tupã, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências, área de Agronegócio e Desenvolvimento.

Área de concentração: Agronegócio e Desenvolvimento.

Linha de pesquisa: Desenvolvimento e meio ambiente

Orientador: Prof. Dr. Sergio Silva Braga Junior

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

TUPÃ

2025

Ficha catalográfica elaborada pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação da FCE – Unesp, Câmpus Tupã:

G917a Guastali, Ana Caolina da Angela.
Análise de gases poluentes e estratégias sustentáveis em uma empresa do setor de transporte rodoviário agrícola. / Ana Carolina da Angela Guastali. – Tupã: [s.n.], 2025.
62 f. : il.

Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) –
Universidade Estadual Paulista UNESP – Faculdade de
Ciências e Engenharia, 2025.
Orientador: Sérgio Silva Braga Junior
Coorientador: Paulo Sérgio Barbosa dos Santos

1. Dióxido de carbono. 2. Gases de efeito estufa. 3.
Transporte rodoviário de cargas. I. Título. II. Autor.

Fonte: Eliana Kátia Pupim, bibliotecária CRB 8 – 6202. Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: ANÁLISE DE GASES POLUENTES E ESTRATÉGIAS SUSTENTÁVEIS EM UMA EMPRESA DO SETOR DE TRANSPORTE RODOVIÁRIO AGRÍCOLA

AUTORA: ANA CAROLINA DA ANGELA GUASTALI

ORIENTADOR: SERGIO SILVA BRAGA JUNIOR

COORIENTADOR: PAULO SÉRGIO BARBOSA DOS SANTOS

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciências, pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **SERGIO SILVA BRAGA JUNIOR**
Data: 28/05/2025 17:09:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. SERGIO SILVA BRAGA JUNIOR (Participação Virtual)
Docente do Departamento de Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Documento assinado digitalmente
 **LUIS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO**
Data: 28/05/2025 15:31:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. LUÍS ROBERTO ALMEIDA GABRIEL FILHO (Participação Virtual)
Gestão, Desenvolvimento e Tecnologia / Faculdade de Ciências e Engenharia - FCE - UNESP - Tupã/SP

Documento assinado digitalmente
 **DEYVER BORDIN**
Data: 28/05/2025 15:18:48-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DEYVER BORDIN (Participação Virtual)
Pesquisador / Pesquisador

Tupã, 28 de maio de 2025

Impacto potencial desta pesquisa

Este trabalho acadêmico combina uma revisão sistemática da literatura com um estudo de caso sobre a redução do consumo de combustível no transporte rodoviário de cargas, portanto, tem grande relevância científica, ambiental, econômica e social. Tal pesquisa objetivou consolidar conhecimentos sobre estimativas de emissão e práticas sustentáveis, além de identificar oportunidades de inovação e economia para empresas do setor de transporte. Ao propor estratégias para mitigar a emissão de gases de efeito estufa, o estudo reforça o alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS 3, 11 e 13) e o Acordo de Paris, de promover melhorias na qualidade do ar, na saúde pública e na eficiência operacional. Seus resultados podem subsidiar políticas públicas e incentivar o uso de tecnologias limpas, demonstrando que é possível integrar desenvolvimento econômico e proteção ambiental.

Potential impact of this research

This academic work combines a systematic literature review with a case study on reducing fuel consumption in road freight transportation, and therefore has great scientific, environmental, economic and social relevance. This research aimed to consolidate knowledge on emission estimates and sustainable practices, in addition to identifying opportunities for innovation and savings for companies in the transportation sector. By proposing strategies to mitigate greenhouse gas emissions, the study reinforces alignment with the Sustainable Development Goals (SDGs 3, 11 and 13) and the Paris Agreement, to promote improvements in air quality, public health and operational efficiency. Its results can support public policies and encourage the use of clean technologies, demonstrating that it is possible to integrate economic development and environmental protection.

Dedico este trabalho a Deus e à minha família que me incentivaram a buscar meus sonhos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir viver este momento.

Agradeço ao meu marido Silvio e aos meus filhos Joao e Maria, por todo apoio e paciência durante o período da pós-graduação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Sergio Silva Braga Junior e coorientador Prof. Dr. Paulo Sérgio Barbosa dos Santos por me ajudarem a desenvolver esta pesquisa.

Agradeço aos professores do PGAD pelos ensinamentos e aos funcionários da Unesp, essenciais para o funcionamento da universidade.

Agradeço aos convidados da banca de qualificação de mestrado, Prof. Dr. Deyver Bordin e Prof. Dr. Luís Roberto Almeida Gabriel Filho, pelo tempo dedicado as contribuições deste estudo e por estarem presente neste dia tão importante.

Agradeço a Eliana Katia Pupim pela ajuda nas buscas em bases de dados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Portaria nº 206, de 4 de setembro de 2018. Por isso, sou grata à CAPES e à Unesp.

Também sou grata aos contribuintes paulistas e aos contribuintes brasileiros pela manutenção destas instituições. Espero retribuir à sociedade todo este investimento.

*"O conhecimento é um dom que nos ajuda a crescer e a nos tornarmos melhores.
É um convite à responsabilidade, que deve ser exercida com sabedoria e
compaixão." (Papa Francisco).*

GUASTALI, A. C.A. **Análise de gases poluentes e estratégias sustentáveis em uma empresa do setor de transporte rodoviário agrícola**. 2025. 62 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Tupã, 2025.

RESUMO

O transporte rodoviário é essencial para a economia global, especialmente no Brasil, onde é o meio de transporte predominante para a distribuição de mercadorias devido à vasta extensão territorial. Entretanto, a dependência desse modal gera significativas emissões de gases poluentes, como CO₂ e NO_x, que afetam a saúde pública e contribuem para as mudanças climáticas. Este trabalho apresenta discussões sobre inovações tecnológicas e políticas governamentais voltadas à mitigação dos impactos ambientais, destacando exemplos bem-sucedidos da China e da União Europeia, e avaliando sua aplicabilidade no Brasil. Essa pesquisa enfatiza o papel de tecnologias como veículos elétricos e combustíveis renováveis, e o uso de ferramentas avançadas, como aprendizado de máquina e *big data*, para monitorar e reduzir emissões. Além disso são exploradas estratégias de compensação de carbono, incluindo créditos de descarbonização, como alternativas economicamente viáveis. Um estudo de caso analisando uma transportadora rural de pequeno porte demonstra que a adoção de práticas sustentáveis é financeiramente atrativa, com indicadores econômicos como *Payback*, VPL e TIR comprovando alta rentabilidade. Os resultados indicam que, além de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, a implementação de estratégias de descarbonização reforça a competitividade e a sustentabilidade operacional, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Este trabalho evidencia que a integração de práticas sustentáveis ao setor de transporte rodoviário não é apenas viável, mas também lucrativa, contribuindo para uma economia de baixo carbono e para a saúde ambiental e social.

Palavras-chave: Dióxido de carbono. Gases de efeito estufa. Transporte rodoviário de cargas.

GUASTALI, A. C.A. **Analysis of polluting gases and sustainable strategies in a company in the agricultural road transport sector**. 2025. 62 p. Dissertation (Master in Science) – São Paulo State University (UNESP), School of Sciences and Engineering, Tupã, 2025.

ABSTRACT

Road transport is essential for the global economy, especially in Brazil, where it is the predominant means of transportation for the distribution of goods due to its vast territorial extension. However, dependence on this mode generates significant emissions of polluting gases, such as CO₂ and NO_x, which affect public health and contribute to climate change. This paper presents discussions on technological innovations and government policies aimed at mitigating environmental impacts, highlighting successful examples from China and the European Union, and assessing their applicability in Brazil. This research emphasizes the role of technologies such as electric vehicles and renewable fuels, and the use of advanced tools such as machine learning and big data to monitor and reduce emissions. It also explores carbon offsetting strategies, including decarbonization credits, as economically viable alternatives. A case study analyzing a small rural transport company shows that adopting sustainable practices is financially attractive, with economic indicators such as Payback, NPV and IRR proving high profitability. The results indicate that, in addition to reducing greenhouse gas emissions, the implementation of decarbonization strategies strengthens competitiveness and operational sustainability, in line with the Sustainable Development Goals (SDGs). This work shows that integrating sustainable practices into the road transport sector is not only viable, but also profitable, contributing to a low-carbon economy and environmental and social health.

Keywords: Carbon dioxide. Greenhouse gases. Road freight transport.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação gráfica para ilustrar as fases da RSL	23
Figura 2 - Fluxograma PRISMA (2020)	28
Figura 3 - Nuvem de Palavras.....	35
Figura 4 - Cluster de todos os resumos dos textos resultados das buscas	36
Figura 5 - Clusters de palavras dos resumos dos textos selecionados	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definições para a busca	25
Quadro 2 - Critérios de inclusão e exclusão	26
Quadro 3 - Artigos selecionados	29
Quadro 4 - Modelo de Checklist Operacional para Implementação do Programa	52
Quadro 5 - Modelo de Checklist de Monitoramento Pós-Implementação	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicadores Operacionais da Frota	48
Tabela 2 - Custos Estimados de Descarbonização	49
Tabela 3 - Custos Estimados de ARLA 32	50
Tabela 4 - Indicadores de Viabilidade Financeira	55
Tabela 5 - Valores estimados da economia com a descarbonização	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADAGE	<i>A Dynamic Applied General Equilibrium</i>
ARLA32	Agente Redutor Líquido de Óxidos de Nitrogênio Automotivo
CBios	Créditos de Descarbonização
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.
CGE	<i>Computable General Equilibrium</i>
CO ₂	Dióxido de Carbono
CxHy	Hidrocarbonetos
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IBF	Instituto Brasileiro de Florestas
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRI	<i>Índice de Irregularidade Internacional</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IWA	<i>International Workshop Agreement</i>
NO _x	Óxido de Nitrogênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PGAD	Pós-graduação em Agronegócio e Desenvolvimento
PPM	Partes por milhão
PRISMA	Relatórios Preferenciais para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises
Renovabio	Política Nacional de Biocombustíveis
RH	Relações Humanas
ROI	Retorno sobre Investimento
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
TIR	Taxa Interna de Retorno
TtW	<i>Tank-to-Wheel</i>
VIKOR	<i>Vlsekriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje</i>
VPL	Valor Presente Líquido
VPN	<i>Virtual Private Network</i>

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
JUSTIFICATIVA GERAL	18
CAPÍTULO – I.....	21
REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE OS SISTEMAS E MÉTODOS CAPAZES DE ESTIMAR E/OU PREVER A EMISSÃO DE POLUENTES.....	21
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
REFERÊNCIAS	38
CAPÍTULO – II.....	43
ESTUDO DA VIABILIDADE DE COMPENSAÇÃO DE CARBONO PARA UM CAMINHÃO VOLVO FH 460 2018 EM UMA TRANSPORTADORA DE OVOS E INSUMOS	43
1 INTRODUÇÃO.....	43
2 MATERIAIS E MÉTODOS	45
2.1 Dados operacionais do caminhão.....	45
2.2 Cálculo da emissão de carbono	46
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
3.1 Análise dos custos e possibilidades de compensação	48
3.2 Proposta de programa de descarbonização	51
3.3 Cálculos de viabilidade financeira	53
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59

INTRODUÇÃO GERAL

O transporte rodoviário é muito importante para a economia mundial, pois distribui produtos indispensáveis para o nosso dia a dia. No Brasil, esse modal é predominante devido à vasta extensão territorial e à predominância de rodovias como principais vias de transporte de mercadorias. Existe uma dependência significativa do transporte através de caminhões, porém para mitigar os impactos ambientais causados por esse setor, é necessário inovações tecnológicas e estratégias governamentais. Iniciativas globais, como as implementadas na China e na União Europeia (UE), demonstram abordagens que combinam eficiência energética e descarbonização para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, oferecendo alternativas valiosas para o Brasil (Silva, 2019).

Apesar da grande importância econômica, o transporte rodoviário de cargas é uma das principais fontes de poluição, afetando negativamente o meio ambiente e a saúde pública. O aumento dos níveis de dióxido de carbono (CO₂) gerados por essa indústria representa um desafio significativo, especialmente em relação às mudanças climáticas, resultando em deterioração da qualidade do ar e intensificação do efeito estufa nas grandes cidades (Bertinatto, 2021).

As emissões dos transportes rodoviários não afetam apenas as alterações climáticas, também impactam o bem-estar da população, contribuindo para problemas respiratórios e cardíacos. Poluentes como óxido de nitrogênio (NO_x) e CO₂ estão associados a essas doenças, sobrecarregando os sistemas de saúde. O avanço tecnológico é importante para enfrentar esses desafios, utilizando ferramentas como modelos computacionais e aprendizado de máquina para prever emissões e sugerir soluções mais eficazes (Moraes, 2023).

É inevitável explorar opções que harmonizem o progresso econômico com a sustentabilidade. Tecnologias limpas, como veículos elétricos e híbridos, além da promoção de combustíveis renováveis, são identificadas como medidas eficazes para reduzir as emissões de carbono nesse setor (Soares, 2023). Nações como a China e os países da UE têm avançado na implementação de medidas para reduzir as emissões de carbono no transporte, desenvolvendo infraestrutura para veículos elétricos, oferecendo incentivos fiscais para combustíveis renováveis e utilizando tecnologias inovadoras para monitoramento de emissões poluentes. Foi desenvolvida uma infraestrutura para veículos elétricos, sendo fornecidos incentivos fiscais para

combustíveis renováveis e usadas tecnologias inovadoras para monitoramento de emissões de gases poluentes. Essas ações servem como modelos para o Brasil, que enfrenta desafios relacionados à dependência de combustíveis fósseis e à insuficiência de infraestrutura para combustíveis alternativos. No entanto, iniciativas promissoras como o Renovabio visam incentivar a produção e o consumo de biocombustíveis (Oliveira, 2023).

Ferramentas como aprendizado de máquina, *big data* e sistemas avançados de monitoramento são úteis para prever a propensão das emissões, otimizar rotas e propor estratégias para reduzir os impactos ambientais. Além disso, a compensação de carbono, por meio de créditos de descarbonização (CBios) e programas semelhantes, oferece uma forma clara de diminuir as emissões. Para empresas de pequeno porte que atuam no transporte rodoviário, essas metodologias proporcionam uma estrutura viável para alinhar suas atividades com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), apoiando a economia verde (Boschi, 2022).

Políticas que incentivam o uso de combustíveis renováveis, como etanol e biodiesel, são esforços proeminentes no Brasil para reduzir as emissões. Contudo, barreiras regulatórias relacionadas à infraestrutura e à aceitação de mercado dificultam a implementação bem-sucedida dessas medidas. Os ODS sugeridos pela Organização das Nações Unidas (ONU) são referências valiosas para integrar preocupações ambientais, econômicas e sociais. O transporte rodoviário de cargas está diretamente relacionado a vários ODS, como o ODS 3 que aborda saúde e bem-estar, ODS 11 cidades e comunidades sustentáveis e ODS 13 ações contra mudanças climáticas, evidenciando a necessidade de esforços alinhados nesse setor (Farias, 2019). Os ODS estão alinhados com a linha de pesquisa 2, Desenvolvimento e Meio Ambiente, do programa de Pós-graduação em Agronegócio e Desenvolvimento (PGAD) no sentido de promover soluções sustentáveis para a indústria, prestação de serviços e outras áreas.

Um exemplo prático desse esforço é um estudo de caso que investiga a compensação de carbono em uma pequena empresa de transporte rodoviário de cargas no Brasil. O estudo demonstrou a viabilidade de integrar práticas ecologicamente corretas em operações de menor escala. Utilizando tecnologias como diesel S10 e ARLA 32, descarbonização de motores anualmente, treinamento de motoristas para dirigirem com velocidade adequada a menor consumo de combustível, foi possível evidenciar como pequenas empresas podem adotar

estratégias sustentáveis. Os resultados financeiros mostraram que essas ações não apenas atendem aos padrões ambientais, mas também proporcionam benefícios econômicos significativos.

A análise de viabilidade do estudo destaca os benefícios financeiros do investimento em estratégias de redução de emissões. O rápido retorno sobre investimento (ROI- *Return on Investment*) e as vantagens econômicas e operacionais demonstram a eficácia desses esforços. É necessário integrar essas ações com políticas públicas que promovam práticas comerciais sustentáveis. Alinhar as atividades do setor privado com iniciativas governamentais, como regulamentações claras e incentivos fiscais, é vital para consolidar melhorias no setor de transporte.

Conforme apontado por Alves (2024), o aprimoramento de métricas econômicas que impactem positivamente a sociedade e o meio ambiente resultam de medidas como a promoção de energias renováveis, inovação tecnológica, educação e conscientização, regulamentação de políticas públicas, responsabilidade social corporativa e investimentos em infraestrutura verde. A redução de poluentes melhora a qualidade do ar, diminui problemas de saúde associados e apoia uma economia mais estável e resiliente.

O futuro do transporte terrestre depende da adoção de práticas sustentáveis. Ao investir em soluções inovadoras e sustentáveis, o Brasil pode se tornar um contribuidor significativo para os esforços globais de sustentabilidade. Integrar políticas públicas de tecnologia e estratégias comerciais é fundamental para equilibrar o desenvolvimento econômico com a conservação ambiental, beneficiando as gerações atuais e futuras (Morais, 2023). A cooperação intersetorial é vital para a adoção bem-sucedida de avanços tecnológicos e mudanças nos padrões de consumo.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre sistemas e métodos capazes de estimar e/ou prever a emissão de contaminantes, como modelagem matemática, inventários de emissões de gases de efeito estufa (GEE), sensoriamento remoto através de drones e satélites, simulações computacionais, estações de monitoramento em tempo real das difusões e análises de cenários podem contribuir para a redução dos poluentes.

Além de elaborar um estudo de caso sobre a viabilidade da compensação de carbono para um caminhão em uma transportadora de pequeno porte, que atua no setor rural de ovos e insumos. A revisão sistemática da literatura e o estudo de caso

se justificam pela relevância acadêmica, destacando a importância da sustentabilidade no transporte rodoviário e os impactos ambientais e econômicos das emissões decorrentes dessa atividade crucial para a economia nacional. Este estudo se destaca pelo diferencial da contextualização do cenário onde foi aplicado o resultado da RSL, bem como a metodologia utilizada na prática da pesquisa, juntamente com o *insight* prático feito com os dados empíricos e exemplos concretos demonstrados que ilustram os impactos ambientais e econômicos no transporte rodoviário de cargas.

Debater este tópico permite que outras pesquisas busquem o avanço em novas metodologias e soluções tecnológicas voltadas para a redução dos efeitos ambientais, apoiando futuros esforços e ampliando o entendimento científico na logística sustentável. Neste estudo foi explorado a tecnologia de descarbonização como nova medida de auxílio na redução de emissão de GEE. Além disso, sua natureza interdisciplinar abrange economia, engenharia e ciências ambientais, ressaltando sua importância no agronegócio e promovendo oportunidades para parcerias acadêmicas diversas.

No âmbito da política e da sociedade, o tema é relevante por abordar questões fundamentais relacionadas à saúde pública, meio ambiente e eficácia econômica. A promoção de políticas que incentivem a redução das emissões de carbono no transporte é cada vez mais necessária, dada a responsabilidade do Brasil com os ODS e o Acordo de Paris¹. Socialmente, esse assunto impacta diretamente a qualidade de vida ao propor medidas para diminuir a poluição do ar, o que pode resultar em menores taxas de doenças respiratórias e cardiovasculares. Esta pesquisa contribui para as discussões sobre desenvolvimento sustentável, econômico e justiça social, enfatizando a importância de iniciativas que promovam um transporte mais limpo e eficiente.

JUSTIFICATIVA GERAL

A escolha do tema fundamenta-se na relevância crescente das questões ambientais e econômicas no transporte rodoviário, um setor essencial para a

¹ O Acordo de Paris foi celebrado em Paris em 12 de dezembro de 2015 e firmado em Nova Iorque em 22 de abril de 2016. Seu objetivo é reduzir a emissão de gases do efeito estufa e manter o aumento da temperatura do planeta abaixo de 2 °C (Carvalho *et al.*, 2017).

economia global e brasileira. O Brasil, devido à sua vasta extensão territorial e dependência do transporte rodoviário, enfrenta desafios críticos relacionados à emissão de poluentes, especialmente CO₂, NO_x e material particulado, que comprometem a saúde pública e a qualidade do ar. Esses desafios são agravados pela predominância de combustíveis fósseis e pela falta de infraestrutura para combustíveis renováveis e tecnologias limpas.

A justificativa do estudo está alinhada à necessidade de harmonizar crescimento econômico e proteção ambiental, seguindo as diretrizes dos ODS e do Acordo de Paris, que exigem ações concretas para mitigar as mudanças climáticas. Políticas públicas globais, como as implementadas na UE e na China, destacam-se como modelos de sucesso e oferecem subsídios valiosos para o Brasil adotar soluções mais eficazes no transporte rodoviário. Essas iniciativas incluem incentivos fiscais para combustíveis renováveis, expansão da infraestrutura para veículos elétricos e híbridos, e tecnologias avançadas de monitoramento.

A relevância acadêmica desta pesquisa está na sua abordagem interdisciplinar, que une economia, engenharia e ciências ambientais. A revisão sistemática da literatura proposta permite identificar lacunas de conhecimento e explorar metodologias que auxiliem na estimativa e previsão de emissões de poluentes, enquanto o estudo de caso sobre compensação de carbono fornece uma análise prática e aplicável. Além disso, o tema apresenta uma oportunidade para desenvolver novas soluções tecnológicas e metodológicas para o setor, incentivando futuras pesquisas e parcerias.

No âmbito político e social, o tema é especialmente relevante por abordar impactos diretos sobre a saúde pública e a justiça ambiental. A promoção de práticas sustentáveis no transporte rodoviário pode reduzir significativamente as doenças respiratórias e cardiovasculares associadas à poluição do ar, melhorando a qualidade de vida da população. Por outro lado, ao destacar os benefícios econômicos da redução de emissões, como o ROI, uso de tecnologias sustentáveis e o alinhamento às políticas globais, o trabalho propõe soluções viáveis para empresas de diferentes portes, incluindo pequenas transportadoras.

Contribuir para o desenvolvimento sustentável exige esforços colaborativos entre o setor privado, o governo e a sociedade. Este trabalho propõe integrar estratégias comerciais com políticas públicas, destacando a importância de regulamentações claras, incentivos fiscais e cooperação intersetorial. Ao enfatizar a

viabilidade financeira e os benefícios ambientais de medidas como o uso de combustíveis renováveis, tecnologias de monitoramento e compensação de carbono, o estudo reafirma a relevância do tema e a sua contribuição para a redução dos impactos ambientais e para o avanço de um modelo de transporte mais limpo e eficiente no Brasil.

CAPÍTULO – I

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA SOBRE OS SISTEMAS E MÉTODOS CAPAZES DE ESTIMAR E/OU PREVER A EMISSÃO DE POLUENTES

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as emissões de poluentes geradas pelo transporte rodoviário de cargas tem levado à necessidade de desenvolver sistemas e métodos eficazes para estimar e/ou prever essas emissões. O setor de transporte é responsável por uma parte significativa das emissões de GEE e poluentes atmosféricos, impactando a saúde pública e o meio ambiente, de acordo com a Empresa De Pesquisa Energética (EPE, 2022). Assim, a implementação de estratégias para mitigar esses impactos é crucial.

Nos últimos anos, diversas abordagens têm sido propostas para a modelagem e previsão das emissões no transporte rodoviário. Esses métodos variam desde modelos de simulação baseados em dados históricos até algoritmos de aprendizado de máquina que utilizam grandes volumes de dados para prever tendências futuras. A utilização de combustíveis alternativos, melhorias na eficiência dos veículos e inovações tecnológicas também desempenham um papel importante na redução das emissões.

O transporte rodoviário de cargas é vital para a economia global, mas também é uma das principais fontes de emissões que afetam o meio ambiente e a saúde pública, contribuindo para o aumento dos níveis de CO₂ e a deterioração da qualidade do ar (Bertinatto, 2021). No Brasil, a dependência de caminhões para o transporte de mercadorias exige inovações tecnológicas e estratégias governamentais para mitigar os impactos ambientais. Iniciativas como as da China e da UE, que focam em eficiência energética e descarbonização, são exemplos a serem seguidos (Silva, 2019).

Políticas que incentivam o uso de combustíveis renováveis, como etanol e biodiesel, são esforços significativos no Brasil, mas enfrentam barreiras regulatórias que dificultam sua implementação. Os ODS da ONU, especialmente os 3, 11 e 13, destacam a necessidade de ações coesas para abordar essas questões (Farias, 2019).

As emissões de poluentes do transporte rodoviário estão ligadas a problemas de saúde, como doenças respiratórias e cardíacas, e o avanço tecnológico, incluindo modelos computacionais e aprendizado de máquina, pode ajudar a prever e reduzir essas emissões (Guimarães, 2019). Na Europa, medidas de eficiência energética têm demonstrado compensar os impactos do crescimento populacional e econômico nas emissões. Apesar dos avanços no Brasil, a expansão da frota de caminhões ainda representa um desafio significativo para a redução de emissões (Silva, 2019).

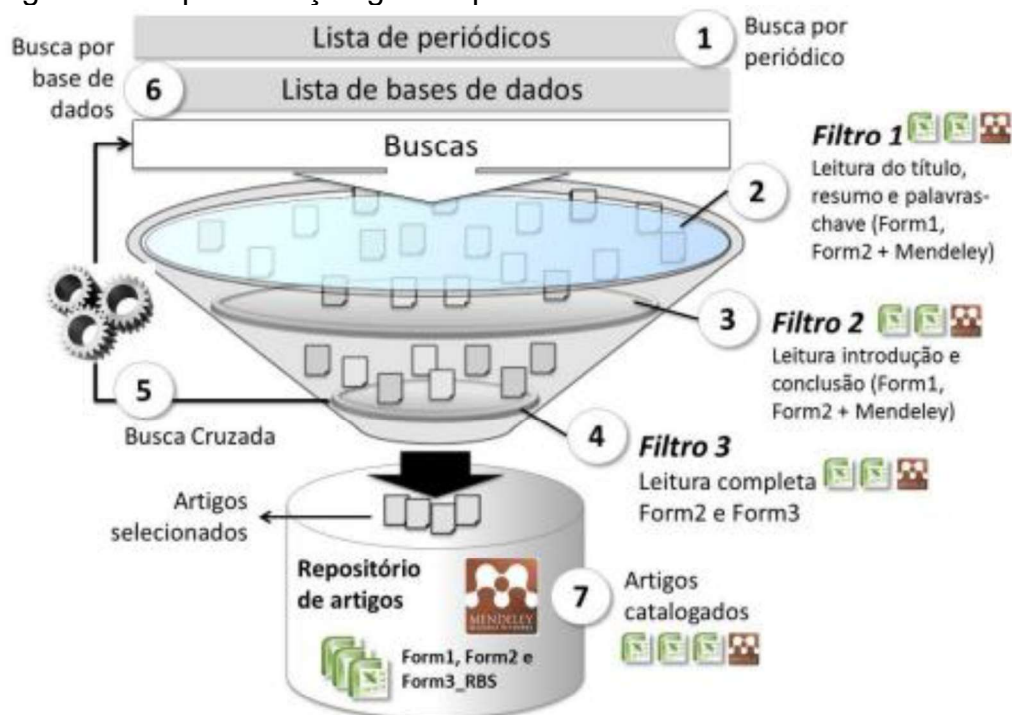
Alcançar a neutralidade de carbono no transporte rodoviário é viável com esforços colaborativos. No Brasil, a transição para energia sustentável deve ser apoiada por políticas que promovam a conscientização social e ofereçam incentivos fiscais. Estratégias como sistemas de regulamentação de emissões, semelhantes ao *cap-and-trade*, um mecanismo que estabelece um limite máximo de emissões (cap) e permite que empresas comprem ou vendam permissões de emissão (trade), estimulando financeiramente a redução de poluentes, têm mostrado eficácia em outros países (Bertinatto, 2021).

Esta revisão sistemática da literatura tem como objetivo analisar os principais sistemas e métodos utilizados para estimar e prever as emissões de poluentes no transporte rodoviário de cargas. Através de uma análise crítica das abordagens existentes, pretende-se identificar lacunas no conhecimento e sugerir direções para pesquisas futuras, contribuindo assim para o desenvolvimento de políticas e práticas mais sustentáveis no setor de transporte.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) de Conforto *et al.* (2011) foi usada para orientar este estudo, ilustrada conforme a Figura 1. Devido à importância de examinar as emissões de CO₂ no transporte rodoviário de cargas, uma busca sistemática da literatura foi feita sobre os sistemas e métodos capazes de estimar e/ou prever a emissão de poluentes, tanto no conceito acadêmico, quanto tecnológico, pois a alta quantidade de CO₂ no meio ambiente implica na economia e nas questões sociais da população.

Figura 1 - Representação gráfica para ilustrar as fases da RSL



Fonte: Conforto et al., (2011).

Uma RSL é uma abordagem científica usada para pesquisar e avaliar artigos dentro de uma área específica da ciência. De acordo com Brereton *et al.* (2007), este método permite aos pesquisadores conduzirem avaliações completas e confiáveis. Uma diretriz processual foi desenvolvida com base nas principais práticas no campo da análise acadêmica. O principal benefício para a teoria e a prática está na formalização do processo de revisão sistemática, oferecendo aos pesquisadores um ponto de referência valioso neste domínio. A RSL provou ser altamente benéfica para pesquisar o assunto e atingir os resultados desejados.

De acordo com Galvão e Pereira (2014) as RSL são consideradas estudos secundários, feitos a partir de fontes de dados primárias. Entende-se por estudos primários os artigos científicos que relatam os resultados de pesquisa em primeira mão. Os autores Conforto *et al.* (2011), propõem um roteiro para elaboração da RSL, composto de uma visão geral, constituída em três fases, a entrada, o processamento e a saída, considerando os respectivos resultados obtidos. Existe na literatura algumas formas de representar o processo da RSL.

O *software* StArt² foi utilizado para a coleta, seleção e extração de textos, como suporte, sendo possível obter mais informações dos textos utilizados, em um tempo reduzido, permitindo aumentar a clareza na escolha dos artigos. O *software* é dividido em três etapas: planejamento, execução e sumarização. O planejamento de uma RSL é uma etapa crucial para garantir a rigorosidade e a qualidade da pesquisa. A utilização do *software* StArt proporciona uma abordagem estruturada e eficiente para a realização desse tipo de revisão, contribuindo para a produção de revisões sistemáticas de alta qualidade que podem informar práticas e políticas em diversas áreas do conhecimento.

No planejamento foi iniciado um protocolo com todas as informações necessárias para fazer a seleção dos artigos. Este protocolo é um conjunto de diretrizes que orienta a condução da RSL. Já na execução foram utilizadas as ideias obtidas e retiradas dos textos pesquisados. Esta fase do software é um processo rigoroso e sistemático que contribui para a integridade e a reprodutibilidade da pesquisa científica. Ao seguir essas etapas estruturadas, os pesquisadores podem garantir que suas revisões sejam fundamentadas, claras e úteis para a comunidade acadêmica.

E por último, na sumarização foi feito o registro dos resumos dos textos, que incluiu estatísticas descritivas; dados categorizados e relatórios textuais cujo processo visa garantir que as informações extraídas dos estudos sejam apresentadas de maneira clara e útil, contribuindo para a compreensão do estado atual do conhecimento sobre o tema em questão.

Após a criação do arquivo no StArt, foram definidas as palavras chaves em inglês (*strings*). Conforme Quadro 1 os termos foram delimitados nas questões principais da pesquisa e conforme as *strings* para cada fase, respeitando os manuais de buscas lógicas de acordo com as bases de dados. A *string* de busca pode ser determinada como um bloco de caracteres que ligam termos de interesse, palavras chaves, com operadores *booleanos* a serem utilizados nos sistemas de buscas nas bases de dados de artigos científicos.

² O *software* State of the Art through Systematic Review (StArt) foi desenvolvido pelo Laboratório de Pesquisas em Engenharia de Software (LaPES) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) com a finalidade de apoiar a aplicação da técnica de RSL, melhorando a qualidade de sua execução. Oferece uma sistematização para a organização e classificação de artigos, que pode ser adquirida no site do laboratório. Essa ferramenta visa facilitar o trabalho dos pesquisadores e tem como objetivo aumentar a produção de revisões e mapeamentos sistemáticos (LaPES, 2013).

Já na execução foram utilizadas as ideias obtidas e retiradas dos textos pesquisados. E por último, na sumarização foi feito o registro dos resumos dos artigos.

Após a criação do arquivo no StArt, foram definidas as palavras chaves em inglês, e os termos foram delimitados nas questões principais da pesquisa para cada fase de dados, respeitando os manuais de buscas lógicas das plataformas IEEE, Scopus, *Scielo*, *Web of Science* e *ScienceDirect*. Ao realizar buscas em diferentes plataformas, é crucial considerar as implicações de cada uma para otimizar a pesquisa. A escolha da plataforma deve ser guiada pelo foco do estudo, pela necessidade de acesso a artigos revisados por pares, e pela importância de métricas de impacto. Além disso, a combinação de várias plataformas pode enriquecer a pesquisa, oferecendo uma visão mais abrangente e diversificada sobre o tema em questão.

Quadro 1 - Definições para a busca

Perguntas	Detalhes
P1	Em que tipo de transportadoras rodoviárias o cálculo de carbono emitido está sendo utilizado?
P2	É possível medir a quantidade de carbono emitido em todas as transportadoras rodoviárias?
P3	Quais os aspectos positivos e negativos de medir o carbono emitido nas transportadoras rodoviárias?

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para a execução das buscas nas bases de dados foram utilizados os seguintes termos e sinônimos: *carrying, moving, driving, movement, mobility, travel, locomotion*, CO₂, NO₂, *air pollution*, ARLA32, Biodiesel, *carbon dioxide, carbon emission, Ccrbon foot print, carbon monoxide, descarbonization*, Diesel, *Diesel emissions*, Diesel engine, Diesel exhaust, Diesel exhaust emission, Diesel exhaust fired, GHG emissions, Greenhouse gas emissions, Nitrogen dioxide, NO_x, NO_x emissions. NO_x reduction, road transport, Sulfur, sustainability, transport, transport sector, truck.

A *string* de busca limitada e definida utilizada nesse estudo foi (*carbon offset*) and (*road transport*) nas bases de dados IEEE, *Scielo*, *ScienceDirect*, *Scopus* e *Web of Science*.

A definição das palavras-chave e *strings* de busca apresentou desafios relacionados à necessidade de equilibrar especificidade e abrangência. Foi essencial garantir que os termos capturassem os aspectos principais da pesquisa, como "*carbon offset*" e "*road transport*", sem excluir trabalhos relevantes. Para isso, foram utilizados sinônimos e termos complementares, como "*carbon dioxide*", "*descarbonization*" e "*NOx reduction*", além de operadores booleanos, respeitando as particularidades das bases de dados, como IEEE, *Scielo* e *Web of Science*.

Outro ponto crítico foi a adequação das *strings* às questões principais do estudo, delimitando claramente os objetivos da pesquisa. Essa abordagem visou obter resultados consistentes e evitar a inclusão de artigos fora do escopo. A estruturação lógica e a utilização de manuais de busca garantiram maior eficiência e qualidade na seleção dos textos, resultando em uma base sólida para análise.

Depois dos termos serem determinados, foram definidos os critérios de inclusão e exclusão dos termos, conforme Quadro 2. Os parâmetros são para auxiliar a seleção dos artigos com maior rigor estratégico. Esses critérios garantem a seleção adequada da população-alvo, permitindo que os resultados sejam generalizáveis e relevantes. Os critérios de inclusão são as características que um artigo deve apresentar para ser admitido no estudo, e devem ser claramente definidos. Entretanto, os de exclusão são características que desqualificam potenciais trabalhos a serem utilizados no estudo em questão. A criação de critérios de inclusão e exclusão é um processo crítico que impacta diretamente a validade e a aplicabilidade dos resultados de uma RSL. A transparência e a justificativa dos critérios escolhidos devem ser claramente descritas nos protocolos de pesquisa e nas publicações subsequentes.

Quadro 2 - Critérios de inclusão e exclusão

Critério de Inclusão	Critério de Exclusão
Trabalhos que utilizem compensação de crédito de carbono no transporte rodoviário de cargas	Trabalhos que não utilizem compensação de crédito de carbono no transporte rodoviário de cargas
Trabalhos publicados e disponíveis integralmente nas bases científicas buscadas	Trabalhos que não utilizem medição de crédito de carbono no transporte rodoviário de cargas
Trabalhos que usem e/ou referenciem a medição de carbono no transporte rodoviário de cargas	Trabalhos de revisão sistemática

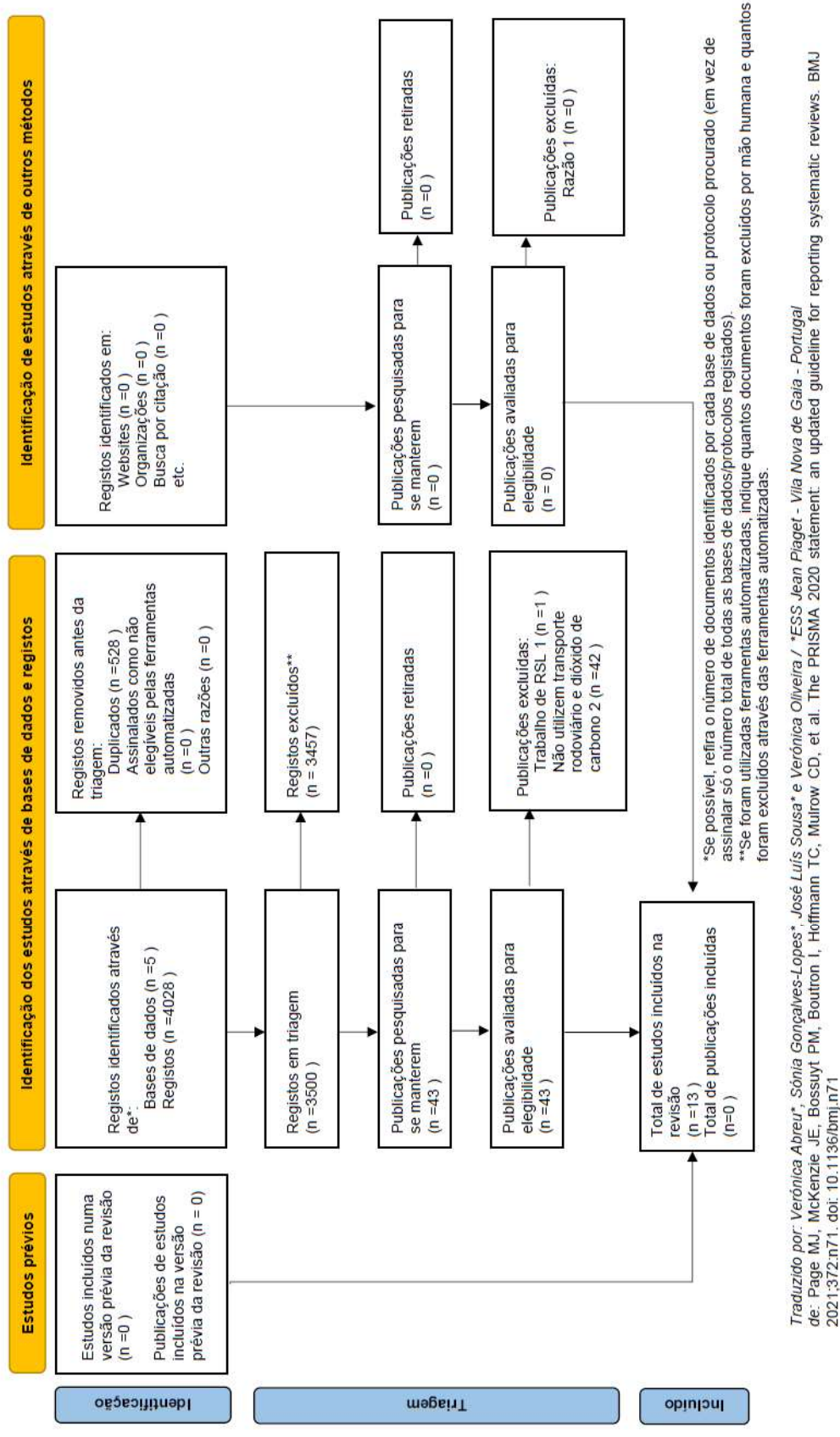
Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Em seguida a definição das *strings* de busca, foi realizada a pesquisa nas bases de dados e feito o download dos arquivos no computador local, com extensão “.BibTex” e “.RIS”, utilizando a *Virtual Private Network* (VPN) da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, através do acesso “eduroam” que permite o acesso a periódicos, artigos, revistas e outras bases de divulgação científica exclusiva para assinantes. E então, foi efetuada a inserção dos arquivos baixados anteriormente no software StArt o qual realizou a análise e devolveu os resultados com os respectivos artigos selecionados para o presente estudo.

A Figura 2 sintetiza os passos do desenvolvimento de forma visual no diagrama de fluxograma Prisma de seleção de artigos, onde é demonstrado os arquivos pesquisados nas principais bases de dados.

Para a realização das buscas, foi definido que apenas artigos originais e a partir de 2019 seriam inseridos neste presente estudo. Na IEEE foi encontrado apenas 1 artigo, na *Scielo* não foi localizado nenhum artigo para este estudo, na *Science Direct* foram encontrados 3970 artigos, na *Web of Science* 37 artigos e finalmente na Scopus 20 artigos. Deste total de 4028 artigos. 528 são duplicados, e 3257 foram rejeitados pelos critérios e exclusão do StArt, ficando 243 para a leitura do título e resumo. Após a leitura foram aceitos 43 artigos para avaliação completa, sendo rejeitados 30, ficando para a RSL 13 artigos a serem analisados na integra.

Figura 2 - Fluxograma PRISMA (2020)



Fonte: Elaborado pela autora (2024).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadro 3 apresenta os 13 artigos que foram selecionados para o presente estudo.

Quadro 3 - Artigos selecionados

(continua)

Autor	Título	Ano	Objetivo
CAI, Y. <i>et al.</i>	<i>Insights from adding transportation sector detail into an economy-wide model: The case of the ADAGE CGE model</i>	2023	Incorporar modos e tecnologias de transporte desagregados no modelo ADAGE para avaliar padrões de transporte, consumo de energia e emissões de gases de efeito estufa nos EUA.
CHAVES, G. DE L. D. <i>et al.</i>	<i>Policy influence in the dynamic of energy and carbon dioxide emissions intensity of Brazilian road transport</i>	2021	Avaliar o consumo de energia e emissões de CO ₂ no transporte rodoviário no Brasil considerando políticas de eficiência energética e matriz energética.
FANG, Y. R. <i>et al.</i>	<i>Neutralizing China's transportation sector requires combined decarbonization efforts from power and hydrogen supply</i>	2023	Investigar tendências de emissão de CO ₂ na China usando modelos de cenários integrados e otimização de sistemas de energia.
KAZANCOGLU, Y.; OZBILTEKIN-PALA, M.; OZKAN-OZEN, Y. D.	<i>Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe</i>	2021	Estimar emissões de GEE em transporte rodoviário europeu usando previsão cinza e discutir implicações para sustentabilidade.
KUMAR, A.	<i>Transition management theory-based policy framework for analyzing environmentally responsible freight transport practices</i>	2021	Propor um <i>framework</i> de gestão de transição para práticas de transporte ambientalmente responsáveis na Índia.
LIANG, H.; LIN, S.; WANG, J.	<i>Impact of technological innovation on carbon emissions in China's logistics industry: Based on the rebound effect</i>	2022	Analisar o impacto da inovação tecnológica nas emissões de carbono na logística chinesa e investigar o efeito rebote

Quadro 3 – Artigos selecionados

(conclusão)

Autor	Título	Ano	Objetivo
PENG, J.; CHEN, L.; ZHANG, B.	<i>Transportation planning for sustainable supply chain network using big data technology</i>	2022	Explorar o impacto da tecnologia de <i>big data</i> no planejamento de transporte para redes de suprimentos sustentáveis.
TSEMEKIDI TZEIRANAKI, S. <i>et al.</i>	<i>The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector</i>	2023	Analisar o impacto das políticas de eficiência energética e descarbonização no transporte rodoviário europeu de 2000 a 2018.
YADAV, J.; DEPPENKEMPER, K.; PISCHINGER, S.	<i>Impact of renewable fuels on heavy-duty engine performance and emissions</i>	2023	Investigar o impacto de combustíveis renováveis no desempenho e emissões de motores pesados comparados ao diesel fóssil.
YU, Y. <i>et al.</i>	<i>Energy carbon emission reduction of China's transportation sector: An input-output approach</i>	2021	Investigar redução de emissões de carbono no transporte chinês utilizando análise de decomposição estrutural e insumo-produto.
WILD, P.	<i>Recommendations for a future global CO₂-calculation standard for transport and logistics Transportation Research Part D</i>	2021	Analisar padrões, métodos, ferramentas, programas e estruturas atuais para cálculo de emissões para transportes e logística. Com esses dados fez uma análise comparativa dessas diretrizes existentes baseada na <i>ISO IWA 16</i> , com objetivo de encontrar elementos para um padrão global de cálculo de emissões de CO ₂ .
WU, X. <i>et al.</i>	<i>Present and future emission characteristics of air pollutants and CO₂ from the Beijing transport sector and their synergistic emission reduction benefits</i>	2023	Analisar sinergias entre redução de emissões de CO ₂ e poluentes em transporte urbano em Pequim para alcançar neutralidade de carbono.
AĞBULUT, Ü.	<i>Forecasting transportation-related energy demand and CO₂ emissions in Turkey with different machine learning algorithms</i>	2022	Prever demanda energética e emissões de CO ₂ no transporte na Turquia usando algoritmos de <i>machine learning</i> e avaliar cenários até 2050.

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Vários estudos revelam progressos nas discussões sobre sistemas e técnicas para prever emissões de poluentes, especialmente no transporte. O alto nível de CO₂ tem impactos significativos na economia e na sociedade, impulsionando a necessidade de trabalhos contínuos em ferramentas preditivas e políticas coesas para apoiar uma redução sustentável nas emissões. Algumas pesquisas propõem novas estratégias para lidar com essas questões de forma eficaz.

O autor Cai *et al.* (2023), enfatiza a importância de protótipos de equilíbrio geral computáveis para analisar efeitos econômicos significativos, como o modelo ADAGE CGE (*Applied Dynamic Analysis of the Global Economy - Computable General Equilibrium*), que é um modelo computacional multirregional, multissetorial e recursivo dinâmico especialmente ao considerar o setor de transporte simula a atividade econômica regional e global de 2010 a 2050 em incrementos de 5 anos. Sua pesquisa aprimorou o modelo ADAGE CGE ao incorporar modos e tecnologias detalhados no transporte rodoviário de passageiros e cargas nos Estados Unidos. As descobertas sugerem que a adoção de eletrificação e tecnologias alternativas é crucial para a redução de emissões, especialmente no alinhamento com os esforços de descarbonização no setor de energia. Esta investigação ressalta a necessidade de modificações estruturais substanciais na indústria de transporte para atingir os objetivos de sustentabilidade.

Chaves *et al.*, (2021) usaram um modelo de dinâmica de sistemas para avaliar as emissões na indústria rodoviária brasileira. Eles exploraram várias estratégias de energia, como o aumento do uso de etanol, biodiesel e eletrificação. Embora essas medidas tenham reduzido apenas 2% das emissões, o estudo destaca a necessidade de uma intervenção governamental mais assertiva, juntamente com a mudança do modo de transporte e tecnologia avançada para produzir resultados notáveis. A pesquisa ressalta que políticas autônomas são insuficientes e defende uma abordagem coerente que combine várias estratégias.

No estudo de Fang *et al.* (2023), investigam os obstáculos para atingir a neutralidade de carbono na indústria de transporte da China até 2060, por meio do modelo de otimização do sistema de energia. O estudo enfatiza que as ações tomadas exclusivamente pelo setor de transporte são inadequadas e enfatizam a importância de combinar esforços com os setores de eletricidade e hidrogênio (H₂). A adoção de fontes de energia renováveis e tecnologias de captura de carbono surgem como medidas viáveis que alteram significativamente o cenário energético da indústria de

transporte. Esta pesquisa ressalta a necessidade de esforços colaborativos em diferentes setores para atender a objetivos ambiciosos de descarbonização.

Em um estudo recente, Kazancoglu Ozbiltekin-Pala e Ozkan-Ozen (2021) utilizaram a técnica de previsão cinza para examinar as emissões GEE no transporte rodoviário em quatro nações europeias. O estudo ressalta a importância da previsão precisa das emissões como base para a formulação de políticas sustentáveis. As descobertas revelam que alterações nos tipos de veículos e fontes de combustível são cruciais para atender aos requisitos de desenvolvimento sustentável, ressaltando o uso de abordagens matemáticas confiáveis para antecipar consequências futuras.

Kumar (2021) criou um método que utiliza a teoria de gerenciamento de transição para reconhecer práticas ecologicamente corretas no transporte de carga. Usando um algoritmo de agrupamento cinza e o método *VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje* (VIKOR), é uma técnica de tomada de decisão multicritério, desenvolvida para ajudar na escolha e classificação de alternativas em problemas que envolvem múltiplos critérios conflitantes. Ele é amplamente utilizado em situações em que o tomador de decisão precisa identificar a solução mais próxima do ideal em um conjunto de opções, levando em consideração um compromisso entre critérios conflitantes. Nesse caso, a pesquisa categoriza terminais de carga eficientes e combustíveis alternativos como prioridades, mas aponta seu desempenho inadequado na Índia. O estudo indica que o aprimoramento de práticas prioritárias e a redução de emissões no transporte de carga exigem políticas específicas e investimentos estratégicos para a transformação sustentável.

Liang Lin e Wang (2022) examinaram como os avanços tecnológicos afetam as emissões no setor de logística da China com foco no efeito rebote. Embora as inovações possam reduzir as emissões inicialmente, os autores observam que seu impacto espacial pode aumentar as emissões, especialmente nas áreas centrais da China. A pesquisa sugere melhorar a alocação de energia e promover a colaboração entre as regiões para lidar com essas consequências adversas.

No estudo de Peng, Chen e Zhang (2022), as ferramentas de *big data* são aproveitadas para projetar sistemas de logística ecologicamente corretos que combinam opções de transporte e varejo dentro das cadeias de suprimentos. O exame inclui várias medidas de controle de carbono com ênfase na importância da incerteza na tomada de decisões. A pesquisa demonstra como alavancar dados pode auxiliar

os gerentes a aprimorar as redes de transporte, também como auxiliar os governos a elaborar estratégias eficientes de redução de emissões.

Tsemekidi Tzeiranaki *et al.* (2023) estudam os efeitos das políticas de eficiência energética e descarbonização no transporte rodoviário europeu. Por meio da análise de decomposição, demonstram a importância da eficiência energética na redução de seu uso. No entanto, a crescente demanda por transporte ainda leva a um aumento nas emissões. A pesquisa enfatiza a necessidade de aprimorar as estruturas de políticas para atender aos objetivos de longo prazo da UE, incluindo avaliações mais precisas dos impactos das políticas.

O estudo feito por Yadav, Deppenkemper e Pischinger (2023) analisa como todos os combustíveis renováveis demonstraram um potencial de redução de emissões de GEE entre 2,5% e 5,5% na análise *Tank-to-Wheel* (TtW). A análise TtW é utilizada para avaliar a eficiência energética e as emissões de GEE junto com a energia usada nos veículos analisados, pois considera todo o ciclo de vida da energia, ou seja, desde o momento em que o combustível ou energia é armazenado no veículo até o movimento dele. Testes com várias misturas de combustível demonstram uma redução notável nas emissões de CO₂ e outras substâncias nocivas quando comparados ao diesel tradicional, sugerindo que os combustíveis renováveis podem atuar como uma solução provisória para atingir a neutralidade climática.

O estudo de Yu *et al.* (2021) usou análise de entrada e saída estendida para examinar como as mudanças estruturais afetam a redução de emissão no setor de transporte chinês. As descobertas mostram que a eficiência energética foi fundamental para reduzir as emissões, enquanto a composição da demanda final é identificada como o principal fator que impulsiona o aumento das emissões. Ele propõe que melhorar a estrutura industrial pode ajudar muito a reduzir as emissões neste setor.

No artigo de Wild, 2021, foram analisados padrões, métodos, ferramentas, programas e estruturas atuais para cálculo de emissões para transportes e logística. Com esses dados o autor fez uma análise comparativa dessas diretrizes existentes baseada na *ISO IWA 16*, com objetivo de encontrar elementos para um padrão global de cálculo de emissões de CO₂. A metodologia utilizada foi uma pesquisa exploratória normativa, baseada em métodos existentes e apoiada na Avaliação de Quarta Geração. Foram realizadas entrevistas com especialistas europeus, que têm uma experiência combinada no setor de 279 anos, quanto ao uso da calculadora de

emissão de CO₂ para incorporar ideias práticas ao projeto. Um verdadeiro padrão global de emissões de CO₂ ainda não está disponível, porém com base nos resultados das entrevistas, apenas pequenos ajustes podem ser necessários no que já existe. A pesquisa declarou que um padrão de emissão global utilizável deve ser baseado em fatores como simplicidade; precisão; flexibilidade; viabilidade e transparência. Por meio da simplicidade da abordagem recomendada, os operadores têm uma chance realista de implementação e permite uma certa flexibilidade, ao mesmo tempo em que garante a comparabilidade.

Wu *et al.*, (2023) examinam os atributos atuais e futuros de CO₂ e descargas de poluentes na indústria de transporte de Pequim por meio da Ferramenta Local de Planejamento e Manejo de Ação Antecipada (LEAP) e determinam que a transição para veículos elétricos e a substituição de combustíveis convencionais por opções ecológicas são etapas essenciais para atingir a neutralidade de carbono. Além disso, enfatizam que alterar o método de transporte e aposentar veículos antigos mais cedo também é significativo para maximizar as vantagens combinadas.

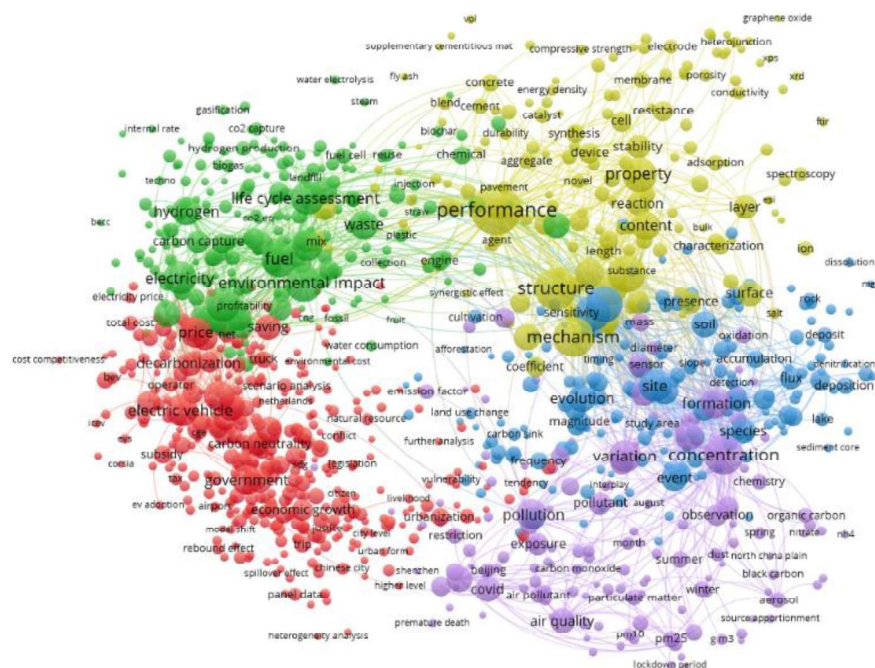
Por fim, Ağbulut (2022) usa métodos de aprendizado de máquina para prever as necessidades de energia e as emissões de dióxido de carbono no setor de transporte da Turquia até 2050. O estudo mostra que o aumento contínuo nas demandas de transporte resultará em um aumento significativo nas emissões de CO₂, o que requer modificações nas políticas de energia e investimentos estratégicos para reduzir esses impactos. Os resultados destacam a importância das tecnologias preditivas como ferramentas vitais para a elaboração de políticas públicas mais eficazes.

Assim, observou-se que estes estudos mostram uma ampla variedade de abordagens e respostas, incluindo *big data* de modelo dinâmico e inovação em aprendizado de máquina. Eles destacam a importância de combinar ciência e tecnologia para prever e reduzir a descarga de poluentes. A colaboração entre setores e o uso de tecnologias avançadas surgem como formas promissoras de atender às necessidades econômicas, ambientais e sociais de forma eficaz.

Ao criar uma análise comparativa dos estudos, revela-se uma abordagem multifacetada para a problemática das emissões de poluentes no setor de transporte. Embora existam diferenças nas metodologias e ênfases, um consenso emerge sobre a necessidade de intervenções governamentais, colaboração intersetorial e a adoção

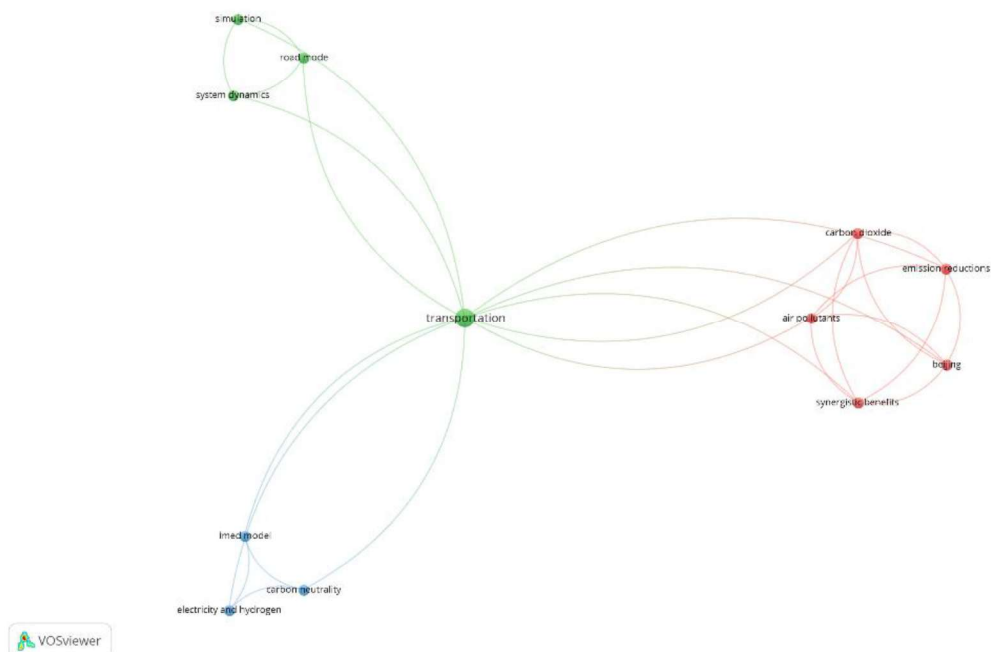
literatura em revisões sistemáticas, contribuindo para a construção de um conhecimento mais robusto e direcionado em áreas específicas de pesquisa.

Figura 4 - Cluster de todos os resumos dos textos resultados das buscas



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 5 - Clusters de palavras dos resumos dos textos seleccionados



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos mostram que os sistemas de cálculo e previsão de poluentes são ferramentas essenciais para lidar com desafios do meio ambiente ligados ao transporte rodoviário de cargas. Tais tecnologias não só permitem uma análise melhor das emissões, mas também atuam como base para planos eficazes de redução, que estão juntos com os ODS.

O uso de combustíveis diferentes, como álcool e biocombustível, e a eletrificação do transporte mostram ser ações viáveis para diminuir emissões de CO₂. No entanto as regras e normas que existem no Brasil mostram a necessidade de políticas robustas e incentivos do governo para garantir uma mudança eficiente e sustentável.

Fez-se notar que as novas tecnologias, como aprendizado de máquinas e *big data*, têm grande potencial para melhorar a exatidão das previsões de emissões e ajudar na criação de políticas públicas. Essas ferramentas podem não só prever impactos no meio ambiente, mas também otimizar a alocação dos recursos e dirigir investimentos em infraestrutura.

A comparação entre diferentes países evidencia que nações como a China e alguns membros da UE têm alcançado notáveis avanços na redução das emissões de carbono no transporte rodoviário de carga. Essas experiências demonstram que esforços conjuntos, envolvendo a integração de diversas áreas e a adoção de ferramentas eficazes para mitigar a pegada de carbono, possuem o potencial de acelerar significativamente a transição para sistemas de transporte mais sustentáveis e limpos.

No Brasil, viu-se que o transporte rodoviário de cargas, mesmo sendo importante para a economia, é um dos maiores emissores de poluição (Oliveira e Santos, 2018). A adoção de regras internacionais, junto com ações de logística verde e incentivos para usar carros híbridos e elétricos pode ser importante para equilibrar os impactos econômicos, ambientais e sociais.

Além dos problemas do meio ambiente, destacou-se o efeito direto dos poluentes no bem-estar das pessoas contribuindo para dificuldades de respiração e problemas cardíacos. O controle desses poluentes não só melhora a qualidade do ar, mas também diminui gastos com saúde pública gerando vantagens sociais significativas. Por fim, conclui-se que para chegar à neutralidade de carbono no

transporte rodoviário de cargas, necessita-se de esforços conjuntos em várias áreas, incluindo regras governamentais, novas tecnologias e consumo consciente dos usuários. Esse conjunto de ações é a chave para contribuir com o crescimento sustentável que atende as necessidades econômicas e ambientais das gerações futuras.

REFERÊNCIAS

AĞBULUT, Ü. Forecasting transportation-related energy demand and CO₂ emissions in Turkey with different machine learning algorithms. **Sustainable Production and Consumption**, v. 29, p. 141–157, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550921002840>. Acesso em: 20 ago. 2024.

ALVES, B. C. **Avaliação do potencial do etanol e seus derivados para descarbonização dos setores Hard-to-Abate**. São Carlos: UFSCAR, 2024. 68 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/20674>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BRAYNER, A. R. A.; MEDEIROS, C. B. Incorporação do tempo em SGBD orientado a objetos. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE BANCO DE DADOS, 9., 1994, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: USP, 1994. p. 16-29.

BRERETON, P.; KITCHENHAM, B. A.; BUDGEN, D.; TURNER, M.; KHALIL, M. Lessons from applying the systematic literature review process within the software engineering domain. **Journal of Systems and Software**, v. 80, n. 4, p. 571–583, 2007. DOI: 0.1016/j.jss.2006.07.009.

BERTINATTO, R.; SCHLOSSER, J. F.; BERTOLLO, G. M.; HERZOG, D.; CASALI, L.; BORSATTO, H. G. Typical performance behavior of a Diesel cycle agricultural tractor engine with electronic injection management and turbocharger. **Ciência Rural**, v. 52, p. e20200966, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20200966>.

BOSCHI, G. **Rotas tecnológicas para eficiência energética e descarbonização na cadeia de valor do setor de transporte rodoviário de carga no Brasil**. São Paulo: FGV, 2022. 122 f. Dissertação (Mestrado em Gestão para a competitividade) – Escola de Administração de empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/32149>. Acesso em: 20 out. 2023.

CAI, Y.; WOOLLACOTT, J.; BEACH, R. H.; RAFAELSKI, L. E.; RAMING, C.; SHELBY, M. Insights from adding transportation sector detail into an economy-wide model: The case of the ADAGE CGE model. **Energy Economics**, v. 123, p. 106710, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988323002086>. Acesso em: 20 out. 2024.

CARVALHO, D. M.; COELHO, A. C. C.; MARTINS, R. S. S.; COSTA, K. R. O acordo de paris: uma análise descritiva. *In: IX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL, XV ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDANTES DE ENGENHARIA AMBIENTAL E III FÓRUM LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA E SUSTENTABILIDADE*, 4, 2017, Belo Horizonte. **Anais [...]**. 2017. DOI: 10.5151/xveneeamb-127. Disponível em: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/o-acordo-de-paris-uma-anlise-descritiva-26797>. Acesso em: 10 abr. 2025.

CHAVES, G. DE L. D.; BOLDRINI, O. N.; ROSA, R. A.; GHISOLFI, V.; RIBEIRO, G. M. Policy influence in the dynamic of energy and carbon dioxide emissions intensity of Brazilian road transport. **Case Studies on Transport Policy**, v. 9, n. 4, p. 1868–1878, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.10.007>.

CONFORTO, E. C; AMARAL, D. C; SILVA, S. L. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTO*, 8., 2011, Porto Alegre. **Anais [...]**. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2205710/mod_resource/content/1/Roteiro%20para%20revis%C3%A3o%20bibliogr%C3%A1fica%20sistem%C3%A1tica.pdf. Acesso em: 15 ago. 2024.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Informativo Técnico n. 011/2022**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

FARIAS, M. S. de.; SCHLOSSER, J. F.; ESTRADA, J. S.; PERIN, G. F.; MARTINI, A. T. Emissions of an agricultural engine using blends of diesel and hydrous ethanol. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 7-16, 2019. DOI:10.5433/1679-0359.2019v40n1p7.

MORAIS, G. R. **Contribuição de um modelo sustentável de otimização e de simulação em rede petri p-temporizada nas estratégias de expansão da rede intermodal de transporte de soja do estado do Mato Grosso**. Belo Horizonte: UFMG, 2023. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/58995>. Acesso em: 10 nov. 2024.

FANG, Y. R.; PENG, W.; URPELAINEN, J.; HOSSAIN, M. S.; QIN, Y.; MA, T.; REN, M.; LIU, X.; ZHANG, S.; HUANG, C.; DAI, H. Neutralizing China's transportation sector requires combined decarbonization efforts from power and hydrogen supply. **Applied Energy**, v. 349, p. 121636, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261923010000>. Acesso em: 15 ago. 2024.

GALVÃO, T. F.; PEREIRA, M. G. Revisões sistemáticas da literatura: passos para sua elaboração. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 23, n. 1, p. 183–184, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ress/a/yPKRNymgtzwzWR8cpDmRWQr/>. Acesso em: 20 ago. 2024.

GUIMARÃES, C. C.; SANTOS, V. M. L. dos; CORTEZ, J. W. Emissão de ruído de motor estacionário com misturas de biodiesel/diesel. **Agrarian**, v. 12, n. 45, p. 354-366, 2019. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/9640>. Acesso em: 20 out. 2024.

KAZANCOGLU, Y.; OZBILTEKIN-PALA, M.; OZKAN-OZEN, Y. D. Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe. **Sustainable Cities and Society**, v. 70, p. 102924, 2021. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/350744870_Prediction_and_evaluation_of_greenhouse_gas_emissions_for_sustainable_road_transport_within_Europe. Acesso em: 20 ago. 2024.

KUMAR, A. Transition management theory-based policy framework for analyzing environmentally responsible freight transport practices. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126209, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126209>.

LIANG, H.; LIN, S.; WANG, J. Impact of technological innovation on carbon emissions in China's logistics industry: Based on the rebound effect. **Journal of Cleaner Production**, v. 377, p. 134371, 2022. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/363901209_Impact_of_technological_innovation_on_carbon_emissions_in_China's_logistics_industry_Based_on_the_rebound_effect. Acesso em: 25 ago. 2024.

MORAES, L. B. de. **Consumo de combustível e emissões de CO² no transporte rodoviário**: do índice de irregularidade internacional ao mercado de carbono. UFSM, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/32208>. Acesso em: 25 set. 2024.

OLIVEIRA, C. M.; SANTOS, M. A. Logística verde e sustentabilidade no transporte rodoviário de cargas no Brasil: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental**, v. 14, n. 3, p. 45-58, 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331530341_A_sustentabilidade_no_transporte_rodoviário_de_cargas_no_Brasil. Acesso em: 09 mar. 2025.

OLIVEIRA, N. K. da S. de.; OLIVEIRA, S. E. de A.; ROCKENBACH, T. S.; SILVA, C. O. da.; SOUZA, M. A. **Gestão de frotas e transporte rodoviário**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Logística) - Escola Técnica do Jaraguá, 2023. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/13365>. Acesso em: 25 out. 2023.

PENG, J.; CHEN, L.; ZHANG, B. Transportation planning for sustainable supply chain network using big data technology. **Information Sciences**, v. 609, p. 781–798,

2022. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020025522008015>. Acesso em: 10 ago. 2024.

PRISMA, 2020. **PRISMA 2020 flow diagram**. Disponível em: <https://www.prisma-statement.org/prisma-2020-flow-diagram>. Acesso em: 12 set. 2024.

SILVA, Flávio C.; ARANHA, F. N.; ANGELKORTE, G. B.; GUARDIOLA, J. F. H.; TEIXEIRA, L. P.; CORREIA, R. C. de B. Quantification and qualification of exhaust gases in agricultural diesel engine operating with biodiesel mixtures. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 794-799, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n10p794-799>.

SOARES, D. G.; MONTEIRO, A. M.; SILVA, B. C. F. L.; OLIVEIRA, A. K. M.; NETO, J. F. R.; DALMAGRO, H. J. Descarbonização do transporte de soja no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil: estratégias para uma logística mais sustentável. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 9, p. 3668-3699, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv20n9-003>.

LaPES. Laboratório de Pesquisa em Engenharia de Software – UFSCar. **StArt**. 2013. Disponível em: <https://www.lapes.ufscar.br/resources/tools-1/start-1>. Acesso em: 6 set. 2024.

TSEMEKIDI TZEIRANAKI, S.; ECONOMIDOU, M.; BERTOLDI, P.; THIEL C.; FANTARAS, G.; CLEMENTI, E. L.; RIOS, C. F. L. The impact of energy efficiency and decarbonisation policies on the European road transport sector. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 170, p. 103623, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856423000435>. Acesso em: 05 set. 2024.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. **VOSviewer**: Visualizing scientific landscapes. 2021. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 25 jan. 2025.

WILD, P. Recomendações para um futuro padrão global de cálculo de CO₂ para transporte e logística. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 100, p. 103024, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921003229>. Acesso em: 05 set. 2024.

WU, X.; HARRISON, R. M.; YAN, J.; WU, T.; SHEN, Y.; CUI, Y.; LIU, X.; YI, H.; SHI, Z.; XUE, Y. Present and future emission characteristics of air pollutants and CO₂ from the Beijing transport sector and their synergistic emission reduction benefits. **Atmospheric Pollution Research**, v. 14, n. 9, p. 101844, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1309104223001988>. Acesso em: 02 set. 2024.

YADAV, J.; DEPPENKEMPER, K.; PISCHINGER, S. Impact of renewable fuels on heavy-duty engine performance and emissions. **Energy Reports**, v. 9, p. 1977–1989, 2023. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484723000185>. Acesso em: 20 ago. 2024.

YU, Y.; LI, S.; SUN, H.; TAGHIZADEH-HESARY, F. Energy carbon emission reduction of China's transportation sector: An input–output approach. **Economic Analysis and Policy**, v. 69, n. C, p. 378–393, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0313592620304616>. Acesso em: 28 ago. 2024.

CAPÍTULO – II

ESTUDO DA VIABILIDADE DE COMPENSAÇÃO DE CARBONO PARA UM CAMINHÃO VOLVO FH 460 2018 EM UMA TRANSPORTADORA DE OVOS E INSUMOS

1 INTRODUÇÃO

O estudo de caso é um método de pesquisa que utiliza, geralmente, dados qualitativos, coletados a partir de eventos reais, com o objetivo de explicar, explorar ou descrever fenômenos atuais inseridos em seu próprio contexto. Caracteriza-se por ser um estudo detalhado e exaustivo de poucos, ou mesmo de um único objeto, fornecendo conhecimentos profundos (Eisenhardt, 1989; Yin, 2009).

Este estudo tem como objetivo avaliar a viabilidade da compensação de carbono para uma empresa de transporte em Bastos SP, uma cidade conhecida como a “Capital Nacional do Ovo”. Bastos prospera em seu setor de agronegócio, particularmente na indústria avícola e infraestrutura logística de suporte. Apesar de ser pequena, a empresa de transporte desempenha um papel essencial no transporte de ovos para Belo Horizonte e no retorno de calcário para dar suporte à cadeia de suprimentos.

O caminhão usado para este estudo foi o Volvo/FH 460 6x2T, fabricado em 2018, foi escolhido para facilitar as análises completas que podem ser replicadas para outros caminhões da frota. Esta decisão foi tomada devido à sua importância operacional e aos dados abrangentes que oferece sobre uso de combustível, distância percorrida e viabilidade econômica.

O transporte de ovos apresenta um desafio ambiental devido ao uso significativo de combustíveis fósseis e às emissões de GEE resultantes. A rota escolhida para esta pesquisa foi entre Bastos e Belo Horizonte, que é crucial para o transporte de ovos e calcário, essencial para a indústria avícola.

O objetivo principal é confirmar as emissões de GEE vinculadas a esta operação e avaliar o potencial de compensação de carbono. Esta pesquisa também busca descobrir chances de reduzir a pegada de carbono, usando práticas e tecnologias sustentáveis atualmente empregadas pela empresa.

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e as regras ambientais está levando a indústria de transporte a tomar medidas proativas para diminuir sua pegada ambiental (Nascimento e Rodrigues, 2024). Esta pesquisa pretende contribuir para esta discussão demonstrando como pequenas empresas de transporte podem explorar opções viáveis para compensar as emissões de carbono.

O estudo não cobre apenas a análise técnica, mas também mostra as iniciativas existentes adotadas pela empresa, que inclui a utilização do óleo diesel S10 para descarbonização anual de veículos e o uso do ARLA 32 para reduzir as emissões de NOx, ilustrando uma dedicação inicial à sustentabilidade. ARLA 32 é a abreviação de Agente Redutor Líquido Automotivo. O número 32 refere-se ao nível de concentração da solução de ureia (32,5%) em água desmineralizada, que atua nos sistemas de exaustão como agente redutor de emissões de NOx (CETESB, 2024).

A empresa se beneficia da localização estratégica em uma área rural com reservas de preservação ambiental, proporcionando oportunidade de reduzir as emissões de carbono e aumentar sua sustentabilidade no mercado. Uma avaliação preliminar das emissões será conduzida usando fatores de emissão padrão para o diesel S10, conforme descrito pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021). A descoberta permitirá a determinação das emissões gerais de CO₂ e facilitará uma estratégia de mitigação.

Entre as diferentes opções disponíveis, a obtenção de Créditos de Descarbonização (CBios) é uma opção notável na iniciativa RenovaBio. Este método apresenta uma resposta financeiramente viável para empresas que visam alinhar suas atividades com metas internacionais de sustentabilidade. Esta tecnologia pode fornecer medição de emissão mais precisa e auxiliar no planejamento de compensações direcionadas.

Este estudo de caso mostra que pequenas empresas podem adotar práticas ambientais bem-sucedidas e causar impactos positivos no setor de transporte agroindustrial, apesar de terem poucos recursos. A estratégia foca na viabilidade técnica e financeira, com ênfase na sustentabilidade como principal vantagem competitiva.

A pesquisa propõe uma estratégia de expansão que viabiliza a aplicação da avaliação a toda a frota de caminhões, permitindo uma análise abrangente das emissões e das formas de neutralizá-las. Essa iniciativa reforça a importância de

integrar a sustentabilidade à estratégia corporativa, destacando seu papel no enfrentamento das mudanças climáticas

Para este estudo, foi escolhida a opção de descarbonização de um motor a diesel, que é um procedimento técnico para remover depósitos de carbono acumulados dentro do motor. Quando não removidos, esses depósitos podem prejudicar a eficiência e o desempenho do motor. A limpeza contribui para uma combustão mais eficiente, resultando em maior potência, menor consumo de óleo diesel e redução nas emissões de GEE. De acordo com a Carbo Vapt, empresa que oferece esse tipo de serviço, a descarbonização pode proporcionar uma economia média de até 10% no consumo de combustível (CARBO VAPT, 2023).

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Dados operacionais do caminhão

O veículo selecionado para este estudo de caso é o caminhão trator Volvo/FH 460 6x2T, ano 2018, um modelo robusto, desenvolvido para o transporte de cargas pesadas em longas distâncias. Esta seleção ressalta sua importância na frota de vinte caminhões operados pela transportadora, estando entre os veículos mais utilizados.

O caminhão percorreu 547.033 km de 2 de outubro de 2021 a 6 de novembro de 2024. Isso solidifica sua importância nas operações logísticas da empresa. Uma análise minuciosa do desempenho do caminhão permite uma avaliação precisa da pegada de carbono devido o registro operacional abrangente.

Nesse período foram consumidos 282.308,74 litros de diesel S10, resultando em um consumo médio de 1,94 km/litro. Este valor representa as características operacionais do caminhão e as dificuldades logísticas encontradas pelo transportador em viagens que envolvem grandes distâncias e grandes pesos. Para o resultado da média de consumo ser precisa, foi escolhido o único veículo que trafega sempre no mesmo trajeto e com o peso sempre aproximado. Pegar a frota toda poderia ter alteração da precisão do consumo, pois os veículos têm roteiros e pesos distintos, bem como o tempo de uso de cada veículo, inviabilizando uma comparação fiel aos dados.

O aspecto financeiro do desempenho dos veículos é crucial para esta pesquisa, sendo que o caminhão apresenta resultados favoráveis com rendimento médio de R\$ 7,78/ km rodado, apesar de incorrer em despesa operacional de R\$ 5,22/ km, resultando em lucro operacional de R\$ 2,56/ km.

O trajeto examinado, de Bastos a Belo Horizonte, envolve o transporte de diferentes tipos de cargas em viagens de ida e volta. Na viagem de ida, o caminhão transporta ovos que precisam de manuseio cuidadoso e entrega pontual devido à sua natureza perecível. Na viagem de retorno transporta calcário, um recurso agrícola crucial que fideliza a ligação das empresas ao setor agro-industrial através do apoio logístico.

2.2 Cálculo da emissão de carbono

Para calcular as emissões de carbono do caminhão analisado, utilizou-se o fator de emissão padrão para o óleo diesel S10. De acordo com as diretrizes do IPCC, o diesel emite aproximadamente 2,68 kg de CO₂ por litro de combustível consumido.

A fórmula utilizada é simples e amplamente aceita para cálculos preliminares de emissões:

$$Emissão\ CO_2(KG) = Consumo\ de\ combustível\ (litros) \cdot Fator\ de\ Emissão\ (kg, \frac{CO_2}{litro}) \quad (1)$$

Aplicando os dados do caminhão Volvo/FH 460 6x2T, com consumo total de 282.308,74 litros durante o período analisado, se tem que:

$$282.308,74 \times 2,68 = 756.587,42\ kg\ de\ CO_2 \quad (2)$$

Assim, a emissão total de CO₂ no período é estimada em 756,59 toneladas. Esse cálculo é baseado apenas no CO₂, sem considerar outros gases emitidos pelo veículo, como NOx e hidrocarbonetos (CxHy). Para uma análise mais abrangente, seria necessário incluir esses gases no escopo, utilizando fatores de conversão adicionais. O resultado obtido fornece uma estimativa inicial das emissões e pode ser usado para calcular a pegada de carbono de toda a frota.

Como citado acima, o fator de emissão de 2,68 kg de CO₂ por litro de óleo diesel foi escolhido com base nas diretrizes do IPCC, que padronizam esse valor para combustíveis fósseis como o óleo diesel S10. Outros fatores de emissão podem variar dependendo da formulação do combustível e da metodologia utilizada para cálculo. A substituição do fator de emissão padrão por valores regionais ou específicos, como os que consideram variações de composição do óleo diesel ou do uso de biocombustíveis, pode alterar os resultados das emissões totais, ampliando ou reduzindo o impacto calculado.

A análise comparativa das emissões de CO₂ entre diferentes transportadoras é fundamental para posicionar os resultados obtidos em relação à média nacional. Estudos como o de Carvalho Junior *et al.* (2023) destacam a importância de comparar as emissões de CO₂ entre diferentes modais de transporte, evidenciando a relevância de análises comparativas no contexto brasileiro.

Para aprimorar a precisão dos dados, a implementação de dispositivos de monitoramento em tempo real é recomendada. Conforme Moraes (2023), a utilização de modelos de conversão do Índice de Irregularidade Internacional (IRI) em consumo de combustível e emissão de CO₂ pode ser complementada com medições diretas, proporcionando uma base mais sólida para futuras análises e comparações.

Embora o cálculo tenha se concentrado no caminhão Volvo/FH 460 6x2T, uma análise das emissões médias dos outros veículos da frota revela variações significativas devido a diferenças no consumo de combustível, idade dos veículos e capacidade de carga. Além disso, incluir outros gases como NO_x e partículas, que em futuras análises possibilitaria uma visão mais abrangente do impacto ambiental da frota.

A substituição do caminhão por um modelo mais eficiente, híbrido ou elétrico poderia reduzir significativamente as emissões de CO₂, além de gerar economia em longo prazo. No entanto, o impacto financeiro dessa substituição deve ser avaliado com base nos custos iniciais de aquisição, economia operacional e possíveis incentivos fiscais.

Além disso, foi considerado o cálculo total para toda a frota da transportadora, composta por 20 caminhões no período analisado. Os dados operacionais gerais da frota estão apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Indicadores Operacionais da Frota

Indicadores	Valores
Quilometragem total percorrida pela frota	8.924.599,6 km
Consumo total de combustível	2.729.694,425 litros
Média de consumo	3,2695 km/litro
Faturamento /km	R\$ 5,22
Custo/ km	R\$ 3,32
Resultado por quilômetro rodado	R\$ 1,90

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Com base no consumo da frota, a emissão total estimada de CO₂ foi calculada aplicando a mesma fórmula utilizada para o caminhão individual:

$$2.729.694,425 \times 2,68 = 7.315.581,06 \text{ KG DE } CO_2 \quad (3)$$

Portanto, a frota emitiu aproximadamente 7.315,58 toneladas de CO₂ no período analisado. Esse dado reflete o impacto ambiental de toda a operação, considerando que houve variações no número de veículos da frota ao longo do período devido a aquisições e vendas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise dos custos e possibilidades de compensação

O uso do ARLA 32 desempenha um papel essencial na redução das emissões de NOx, um dos principais poluentes gerados pela combustão de diesel. Apesar de sua eficácia em mitigar NOx, o ARLA 32 não impacta diretamente as emissões de CO₂, uma vez que sua função está relacionada à reação química que neutraliza NOx nos gases de exaustão. Em termos comparativos, tecnologias como filtros de partículas também são eficazes na redução de poluentes, especialmente material particulado, e podem ser integradas ao ARLA 32 para alcançar um desempenho ambiental mais abrangente. No entanto, a escolha entre tecnologias deve considerar fatores como custo de implementação, manutenção e impacto no consumo de combustível.

A adoção de CBios é uma alternativa viável para compensar as emissões de GEE. Esses créditos, associados à Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), oferecem às empresas de transporte uma oportunidade de alinhar suas operações às metas de sustentabilidade, reduzindo o impacto ambiental e, ao mesmo tempo, fortalecendo sua imagem perante o mercado. No contexto analisado, a inclusão dos CBios no planejamento estratégico da empresa pode potencializar os benefícios ambientais e econômicos do projeto, consolidando sua posição no setor de transporte.

A descarbonização regular do motor é uma medida técnica que não apenas melhora o desempenho operacional, mas também reduz as emissões de CO₂ indiretamente, ao aumentar a eficiência do motor. Para a frota composta por 20 caminhões, o custo estimado por veículo é de R\$ 2.000,00, abrangendo a limpeza do sistema de combustão e a avaliação de componentes críticos. Esse custo está alinhado com os preços praticados no mercado brasileiro, conforme referências do Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios (Sindirepa Nacional 2024) e Oficina Brasil (2024), sendo um investimento significativo para a sustentabilidade operacional. Essa medida, combinada com o uso de ARLA 32 e uma possível aquisição de CBios, representa uma abordagem integrada para mitigar o impacto ambiental da empresa.

Se a empresa optar pela descarbonização, o caminhão examinado que percorreu uma distância de 547.033 km no período observado acumularia uma despesa total de R\$ 6.000,00 em três anos. Para todos os 20 caminhões da frota, o custo anual desse procedimento seria de R\$ 40.000,00, totalizando R\$ 120.000,00 ao longo dessa duração. Esses números podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Custos Estimados de Descarbonização

Descrição	Valor
Custo anual de descarbonização por caminhão	R\$ 2.000,00
Custo total de descarbonização (3 anos) - 1 caminhão	R\$ 6.000,00
Custo anual de descarbonização para frota completa (20 caminhões)	R\$ 40.000,00
Custo total de descarbonização (3 anos) - frota completa	R\$ 120.000,00

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Além disso, o uso de ARLA 32 é outra medida essencial para reduzir emissões, especialmente de NOx. O custo médio estimado para o uso de ARLA 32

em um caminhão é de R\$ 3.500,00 por ano, com variações de acordo com a quilometragem percorrida. Para o caminhão analisado, o custo total ao longo de três anos seria de R\$ 10.500,00, enquanto para a frota completa o investimento anual seria de R\$ 70.000,00, totalizando R\$ 210.000,00 no mesmo período. Esses valores são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Custos Estimados de ARLA 32

Descrição	Valor
Custo anual de ARLA 32 por caminhão (média)	R\$ 3.500,00
Custo total de ARLA 32 (3 anos) - 1 caminhão	R\$ 10.500,00
Custo anual de ARLA 32 para frota completa (20 caminhões)	R\$ 70.000,00
Custo total de ARLA 32 (3 anos) - frota completa	R\$ 210.000,00

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Outro aspecto digno de nota é que a empresa utiliza exclusivamente óleo diesel S10, um combustível com baixo teor de enxofre (10 ppm de enxofre). Essa abordagem ajuda a reduzir as emissões de partículas e outros poluentes, alinhando-se às regulamentações ambientais no Brasil. Isso ressalta a dedicação da empresa em operar de forma mais sustentável e tendo ganho financeiro nos custos das operações em aproximadamente 2%, por utilizar o óleo diesel S10 junto com o ARLA 32.

Se a empresa optar pela descarbonização e permanecer com a ARLA 32, o custo estimado para manter o caminhão estudado seria de cerca de R\$ 10.000,00 ao longo de três anos. Se isso se aplicar a todos os 20 veículos da frota, essa despesa totalizaria cerca de R\$ 200.000,00 nesse período. Esses números mostram como os esforços de manutenção e controle de emissões podem ajudar na redução da emissão de carbono.

Os ganhos ambientais e financeiros esperados com a implementação das medidas de descarbonização e o uso do ARLA 32 estão alinhados aos ODS, especialmente os ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima) e ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis). A redução estimada de 2% nas emissões totais de CO₂ ao longo de três anos, foi baseada no estudo de caso de Chaves *et al.* (2021) que combinada com o uso de combustíveis mais limpos e tecnologias de mitigação, contribui significativamente para os compromissos nacionais com o Acordo de Paris e a transição para uma economia de baixo carbono.

Para validar os ganhos de eficiência e as reduções de emissões, a implementação de um sistema de monitoramento contínuo com tecnologias emergentes, como sensores IoT e *big data*, seria essencial. Essas tecnologias permitem o rastreamento em tempo real das emissões, otimizando a eficiência operacional e possibilitando ajustes rápidos para atender às metas ambientais e financeiras.

A médio e longo prazo, a redução das emissões e o aumento da eficiência operacional podem fortalecer a imagem da empresa como referência em sustentabilidade no setor de transporte, atraindo investidores e novos clientes comprometidos com práticas ecológicas. Além disso, essas ações ajudam a promover melhorias na qualidade do ar, beneficiando a saúde pública e reduzindo custos relacionados a problemas respiratórios e cardiovasculares em áreas urbanas próximas às rotas operacionais.

3.2 Proposta de programa de descarbonização

A empresa de transporte está trabalhando em um programa de descarbonização para reduzir as emissões de carbono, aumentar a eficiência da frota e atender aos padrões ambientais definidos pelos regulamentos e pelo mercado. O plano inclui treinamento de pessoal sobre o uso de ARLA 32, descarbonização de motores em práticas sustentáveis com monitoramento contínuo de métricas financeiras e operacionais. Essas ações dão suporte à estratégia de longo prazo da empresa para maior competitividade e administração ambiental.

O projeto progride por três estágios principais: preparação, execução e monitoramento. Durante a fase de preparação, há um exame completo do histórico de uso de combustível da frota, registros de manutenção e identificação de provedores adequados para serviços de descarbonização. Uma avaliação inicial abrangente estabelece métricas de desempenho e áreas vitais para aprimoramento. Além disso, esta fase envolve educar motoristas e gerentes sobre técnicas sustentáveis, como métodos de direção eficientes e maximizar o uso de ARLA 32 para garantir a compreensão dos objetivos do projeto por todas as partes interessadas.

Durante o estágio de implementação, os motores dos caminhões da frota passarão por descarbonização com base na estratégia de tempo para minimizar a interrupção. A supervisão do encarregado da frota garantirá a qualidade da execução.

Além disso, a aplicação consistente de ARLA 32, persistirá. Recursos educacionais também serão fornecidos durante este período para promover a adesão às melhores práticas operacionais entre os motoristas.

Durante o estágio de supervisão, é importante avaliar a eficácia das medidas realizadas: fatores, como uso de combustível, custos de manutenção de saída de CO₂ e satisfação do motorista, serão avaliados regularmente. O objetivo é confirmar a obtenção de vantagens projetadas, como uma redução hipotética de 2% no consumo de combustível e menores despesas de manutenção, se confirmam na prática, justificando o investimento, conforme apontado por Kozina *et al* (2020), um motor com resíduos pode aumentar o seu consumo de combustível em mais de 10%. Este procedimento é dividido em duas listas de verificação fornecidas nos Quadros 4 e 5, descrevendo as etapas do programa e a avaliação pós-implementação.

Quadro 4 - Modelo de Checklist Operacional para Implementação do Programa

Etapas	Ação	Responsável	Status
Diagnóstico inicial	Levantar consumo médio de combustível e histórico de manutenção.	Gerente de frota	
Seleção de fornecedores	Contratar oficinas especializadas para descarbonização.	Compras	
Treinamento de equipe	Capacitar motoristas e gestores em práticas sustentáveis.	RH	
Implementação do serviço	Realizar descarbonização em toda a frota.	Oficinas contratadas	
Monitoramento de métricas	Acompanhar consumo, emissões e custos de manutenção após o serviço.	Analista de frota	

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O *checklist* operacional organiza as atividades em etapas e garante que cada uma tenha responsáveis claros. Essa abordagem facilita o acompanhamento do progresso e a identificação de possíveis ajustes, como demonstrado no Quadro 5.

Quadro 5 - Modelo de Checklist de Monitoramento Pós-Implementação

Parâmetro	Métrica a Ser Acompanhada	Frequência	Responsável
Consumo de combustível	Comparar consumo antes e depois da descarbonização.	Mensal	Analista de frota
Emissões de CO ₂	Estimar redução proporcional com base no consumo reduzido.	Mensal	Gerente ambiental
Custos de manutenção	Verificar economia com reparos relacionados ao motor.	Trimestral	Financeiro
Satisfação operacional	Aplicar pesquisa de feedback com motoristas.	Semestral	RH

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

O checklist pós-implementação assegura a avaliação contínua dos resultados do programa. O monitoramento mensal de consumo de combustível e emissões de CO₂ fornece informações cruciais para validar a eficácia das ações implementadas.

3.3 Cálculos de viabilidade financeira

A viabilidade financeira do programa foi avaliada por meio dos indicadores de *Payback*, Taxa Interna de Retorno (TIR) e Valor Presente Líquido (VPL). Esses indicadores são amplamente utilizados em análises financeiras para avaliar a rentabilidade de projetos e ajudam a determinar tanto o tempo necessário para recuperar o investimento quanto a atratividade econômica do programa no longo prazo (Nava *et al.*, 2024).

O *Payback* mede o tempo necessário para que o fluxo de caixa acumulado iguale o investimento inicial. Um curto período de *Payback* indica que o projeto retorna os recursos rapidamente, reduzindo riscos financeiros. A fórmula utilizada é:

$$\text{Payback} = \text{investimento inicial} / \text{fluxo de caixa anual} \quad (4)$$

A TIR é a taxa de desconto que faz com que o VPL de um projeto seja igual a zero. Trata-se de uma métrica financeira utilizada para avaliar a rentabilidade de investimentos, sendo uma ferramenta valiosa na análise de investimentos, ajudando a determinar a viabilidade e a atratividade de projetos. No entanto, deve ser utilizada

em conjunto com outras métricas financeiras, como o VPL. Uma TIR elevada indica que o projeto é lucrativo em relação à taxa mínima de atratividade estabelecida.

Neste trabalho foi utilizada a fórmula conceitual para avaliar a TIR, embora não explicitamente solucionável sem cálculo iterativo, segue o princípio:

$$TIR = \text{Taxa de desconto que torna zero o VPL do Fluxo de Caixa} \quad (5)$$

A Equação 6 demonstra a fórmula da TIR.

$$TIR = \sum_{T=0}^n \frac{Fn}{(1+i)^n} = 0 \quad (6)$$

O VPL é calculado descontando-se os fluxos de caixa futuros a uma taxa predeterminada e subtraindo o investimento inicial. Um VPL positivo significa que o projeto agrega valor ao capital investido. A fórmula do VPL é:

$$VPL = \sum \text{fluxo de caixa}/(1+i) - \text{investimento inicial} \quad (7)$$

Assim sendo, para um único caminhão, o investimento inicial anual para a descarbonização é de R\$ 2.000,00, enquanto o fluxo de caixa anual, resultante de economias em combustível e manutenção, é estimado em R\$ 10.936,00. Na análise financeira deste estudo não foi abordado o uso do ARLA32, pois é obrigatória sua utilização desde 2012 (IBAMA, 2022). O *Payback* é calculado como:

$$Payback = \frac{2000}{10936} \approx 0,18 \text{ anos (ou 2 meses)} \quad (8)$$

Com base na mesma premissa, o VPL e a TIR foram calculados considerando uma taxa de desconto de 10% ao ano. Os resultados indicam um VPL de R\$ 10.762,29 e uma TIR de 83,5%, demonstrando uma excelente atratividade econômica.

Para a frota completa de vinte caminhões, o investimento inicial é de R\$ 40.0000,00 e o fluxo de caixa anual acumulado é de R\$ 218.720,00. O *Payback* é semelhante ao de um caminhão individual, refletindo um tempo de retorno de:

$$Payback = \frac{40000}{218720} \approx 0,18\text{anos (ou 2 meses)} \tag{9}$$

O VPL da frota, também considerando uma taxa de desconto de 10% ao ano, foi calculado em R\$ 208.270,80, enquanto a TIR mantém-se em 83,5%, confirmando a viabilidade financeira do projeto para toda a operação.

Os resultados das análises para um caminhão e para a frota completa estão resumidos na tabela 4.

Tabela 4 - Indicadores de Viabilidade Financeira

Indicador	Caminhão	Frota Completa
Investimento Inicial	R\$ 2.000,00	R\$ 40.000,00
Fluxo de Caixa Anual	R\$ 10.936,00	R\$ 218.720,00
<i>Payback</i>	2 meses	2 meses
Valor Presente Líquido (VPL)	R\$ 10.762,29	R\$ 215.248,80
Taxa Interna de Retorno (TIR)	83,50%	83,50%

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Os cálculos mostram que o programa de descarbonização apresenta altíssima viabilidade financeira. O *Payback* de apenas dois meses minimiza o risco financeiro, enquanto a TIR de 83,5% supera amplamente qualquer taxa de atratividade padrão, tornando o projeto altamente lucrativo. Além disso, o VPL positivo, tanto para um caminhão quanto para a frota completa, reforça que o programa agrega valor ao investimento inicial.

A combinação de benefícios operacionais, como a economia de combustível e a redução de custos de manutenção, com os resultados financeiros positivos consolida a proposta como um investimento estratégico para a transportadora. Isso não apenas melhora a eficiência financeira, mas também posiciona a empresa como uma referência em sustentabilidade no setor de transporte.

Cabe também destacar que no cálculo do VPL e da TIR, as variáveis mais sensíveis identificadas foram o preço do diesel, o fluxo de caixa resultante da economia operacional e a taxa de desconto utilizada. Alterações significativas no

preço do diesel, como aumentos inesperados, podem impactar diretamente o fluxo de caixa anual e, consequentemente, a viabilidade financeira do programa. Para evitar distorções, foram utilizadas estimativas conservadoras baseadas nos valores históricos do combustível e em projeções de mercado. Além disso, a taxa de desconto foi mantida em um patamar realista (10% ao ano), refletindo um cenário prudente para a análise de atratividade econômica.

O curto período de Payback de 2 meses considerou as variações no preço do diesel e os possíveis aumentos nos custos de manutenção. Essa abordagem garante a robustez dos cálculos, mesmo em cenários de volatilidade. A análise demonstrou que, mesmo em condições adversas, o projeto continua viável, confirmando sua resiliência financeira conforme a tabela 5, considerando o valor de R\$5,54 o litro de diesel.

Tabela 5 - Valores estimados da economia com a descarbonização

Período de 2021/2024	Valor de um veículo	Valor para todos os veículos
Consumo do combustível em litros	282.308,74	2.729.694,43
Fator para medir a emissão	2,68	2,68
Emissão de CO ₂ (KG)	756.587,42	7.315.581,07
Economia de 2% na emissão em KG	741.455,67	7.169.269,45
Diferença na emissão de CO ₂ após a descarbonização	15.131,75	146.311,62
Economia do consumo	5.646,17	54.593,89
Economia em reais	R\$31.279,78	R\$302.450,15

Fonte: Elaborado pela autora (2024).

Para ampliar os benefícios obtidos, a empresa pode considerar a expansão do programa para outros veículos que apresentem padrões de consumo e emissões diferentes. Essa medida possibilitaria não apenas a redução das emissões totais de GEE em uma escala maior, mas também a exploração de economias adicionais em operações variadas. O uso de métricas como VPL e TIR na avaliação desses veículos permitiria identificar rapidamente os ativos com maior potencial de retorno financeiro.

A integração de tecnologias emergentes, como sensores IoT e sistemas de *big data*, também pode otimizar o monitoramento e a análise de desempenho dos veículos em tempo real. Essa abordagem fornece informações detalhadas sobre

consumo de combustível, emissões e condições operacionais, permitindo ajustes rápidos para maximizar a eficiência e reduzir ainda mais os custos.

Esses avanços tecnológicos também são fundamentais para orientar ações de compensação ambiental. De acordo com o Instituto Brasileiro de Florestas (IBF) (2020), são necessárias 7 árvores para sequestrar 1 tonelada de CO₂ ao longo de 20 anos. Assim, para sequestrar aproximadamente 7.350.000 toneladas de CO₂, conforme o cálculo da Equação 10.

$$7.350.000 * 7 = 51.450.000 \text{ árvores} \quad (10)$$

Ou seja, seria necessário o plantio de mais de 51.000.000 de árvores para sequestrar a emissão da transportadora analisada, durante o período estudado. E para isso seria necessários mais de 46.000 hectares de terra para plantar essa quantidade de árvores (EMBRAPA, 2022).

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise mostra que introduzir uma iniciativa de descarbonização na empresa de transporte não é apenas economicamente viável, mas também produz vantagens operacionais e ambientais substanciais. A proposta, enraizada em abordagens sustentáveis como descarbonização de motores, utilização consistente de ARLA 32 e instruções da equipe, alinha-se com os requisitos atuais de eficácia e respeito ao meio ambiente. Oferecendo retornos rápidos sobre os investimentos, esta iniciativa surge como uma perspectiva estratégica para a empresa.

A análise financeira revela que o programa fornece valor para o capital investido apoiado por indicadores como período de retorno de dois meses, uma TIR de 83,5% e VPL positivo. Essas métricas demonstram a eficácia do investimento em um único caminhão e uma frota de 20 veículos, garantindo retornos substanciais de curto prazo. Esses dados não apenas confirmam a viabilidade econômica, mas também validam a necessidade de implementação rápida das estratégias propostas.

O sistema também ajuda a reduzir as emissões de carbono e NOx, o que garante a conformidade com as leis ambientais e os ODS. Essa abordagem não apenas cumpre obrigações legais, mas também melhora a reputação da empresa na

indústria, especialmente quando as partes interessadas valorizam fornecedores que são dedicados a práticas de sustentabilidade.

Educar motoristas e supervisores é vital para as realizações do programa. Ensinar a equipe a utilizar métodos como direção econômica e uso eficiente do ARLA 32 garante que essas ações se tornem arraigadas, levando a melhorias contínuas. Além disso, o rastreamento constante de medidas especificadas, como uso de combustível, emissões de CO₂ e despesas de manutenção, garante a eficácia da iniciativa e ajuda a fazer ajustes rápidos quando necessário.

Um aspecto crucial adicional é a escalabilidade do programa. Apesar de ter sido inicialmente projetado para uma frota de 20 caminhões, o resultado favorável sugere expansão potencial no futuro. Essa chance oferece perspectivas para a transportadora ampliar suas atividades, atender às necessidades emergentes do mercado e fortalecer sua posição como inovadora em práticas sustentáveis no transporte.

As vantagens do programa para o meio ambiente são significativas. A redução projetada no uso de combustível não apenas reduz as despesas, mas também ajuda a lidar com as mudanças climáticas. Este esforço, alinhado com a preservação ambiental, fortalece a posição da transportadora como um catalisador para a mudança, trazendo efeitos positivos tanto para a comunidade local quanto para as redes de produção que atende.

Além disso, incorporar o programa nas estratégias gerais da empresa aumenta sua competitividade no mercado. Essa prontidão permite que o negócio atenda a demandas mais rigorosas de clientes significativos, particularmente aqueles no campo agroindustrial que priorizam fornecedores dedicados à sustentabilidade. Em última análise, essa vantagem pode levar à aquisição de novos acordos e impulsionar a reputação da marca ao longo do tempo.

A proposta destaca-se como investimento crucial devido às vantagens notáveis em finanças, operação e meio ambiente. Adotar o programa de descarbonização não apenas aborda os desafios atuais do mercado, mas também posiciona a transportadora para aproveitar as oportunidades futuras, garantindo relevância em um cenário voltado para a sustentabilidade. Vales ressaltar que a descarbonização de motores é opcional.

Este estudo preliminar de viabilidade de descarbonização revela a urgência e a relevância de desenvolver métodos que possam servir como iniciativas de políticas

públicas eficazes. Para futuras investigações, recomenda-se a realização de uma análise aprofundada da viabilidade financeira, considerando variáveis sensíveis no VPL. Essa abordagem permitirá não apenas a avaliação do impacto econômico das propostas de descarbonização, mas também a identificação de estratégias que possam ser implementadas de forma sustentável. A integração desses elementos pode contribuir significativamente para a formulação de políticas que promovam a transição para uma economia de baixo carbono, alinhando objetivos ambientais e financeiros.

REFERÊNCIAS

ALVES, B. C. **Avaliação do potencial do etanol e seus derivados para descarbonização dos setores Hard-to-Abate**. São Carlos: UFSCAR, 2024. 68 p. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/20674>. Acesso em: 20 nov. 2024.

BARTHOLOMEU, D. B.; PÉRA, T. G.; CAIXETA-FILHO, J. V. 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: 10 nov. 2024.

BOSCHI, G. **Rotas tecnológicas para eficiência energética e descarbonização na cadeia de valor do setor de transporte rodoviário de carga no Brasil**. São Paulo: FGV, 2022. 122 f. Dissertação (Mestrado em Gestão para a competitividade) – Escola de Administração de empresas de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2022. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10438/32149>. Acesso em: 20 out. 2023.

CARBO VAPT. **Descarbonização de motores**. Carbo Vapt, 2023. Disponível em: <https://carbovapt.com.br>. Acesso em: 06 abr. 2025.

CHAVES, G. DE L. D.; BOLDRINI, O. N.; ROSA, R. A.; GHISOLFI, V.; RIBEIRO, G. M. Policy influence in the dynamic of energy and carbon dioxide emissions intensity of Brazilian road transport. **Case Studies on Transport Policy**, v. 9, n. 4, p. 1868–1878, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213624X2100170X>. Acesso em: 10 nov. 2023.

CETESB. **COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO**. 2024. Disponível em: [etesb.sp.gov.br/arla-32/#:~:text=ARLA%2032%20é%20a%20abreviaçãode%20nitrogênio%20\(NOx\)](https://etesb.sp.gov.br/arla-32/#:~:text=ARLA%2032%20é%20a%20abreviaçãode%20nitrogênio%20(NOx)). Acesso em: 20 de nov. 2024.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sequestro de CO₂ em Árvores de Eucalipto no Sistema ILPF**. Embrapa Milho e Sorgo: Sete Lagoas, 2022. Disponível em: [https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149131/1/Boletim-244-Sequestro-de-CO₂-em-arvores-de-eucalipto-no-sistema-ILPF.pdf?](https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1149131/1/Boletim-244-Sequestro-de-CO2-em-arvores-de-eucalipto-no-sistema-ILPF.pdf?). Acesso em: 23 mar. 2025.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Informativo Técnico n. 011/2022**. 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/areas-de-atuacao/estudos-socioambientais/SiteAssets/Paginas/Emissoes-de-Gases-de-Efeito-Estufa/Informativo%20Tecnico_11-2022_fatores%20de%20emiss%C3%A3oSMA.pdf. Acesso em: 20 mar. 2025.

IBAMA. INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Agente Redutor Líquido Automotivo (Arla 32)**. 2022. Disponível em: [https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/agente-redutor-liquido-automotivo-arla-32#:~:text=Desde%202012%2C%20por%20for%C3%A7a%20dos,\(%C3%B3xido%20de%20nitrog%C3%AAnio\)%20obrigat%C3%B3rio](https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/agente-redutor-liquido-automotivo-arla-32#:~:text=Desde%202012%2C%20por%20for%C3%A7a%20dos,(%C3%B3xido%20de%20nitrog%C3%AAnio)%20obrigat%C3%B3rio). Acesso em: 23 mar. 2025.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC**. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>. Acesso em: 20 mar. 2025.

MORAIS, G. R. **Contribuição de um modelo sustentável de otimização e de simulação em rede petri p-temporizada nas estratégias de expansão da rede intermodal de transporte de soja do estado do Mato Grosso**. Belo Horizonte: UFMG, 2023. 267 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2023. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/58995>. Acesso em: 10 nov. 2024.

NASCIMENTO RODRIGUES, P. do; CAPPATO, T.F.; DA SILVA MELO, N. H. **Desafios do modal rodoviário brasileiro e seus impactos no e-commerce: Uma análise sob a ótica de uma transportadora**. In: Simpósio. 2024. Disponível em: <http://revista.ugb.edu.br/ojs302/index.php/simposio/article/view/3193>. Acesso em: 20 nov. 2024.

Eisenhardt, K.M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, 1989. DOI: <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>.

JORNAL OFICINA BRASIL. Oficina Brasil. Disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/>. Acesso em: 18 nov. 2024.

MORAES, L. B. de. **Consumo de combustível e emissões de CO₂ no transporte rodoviário: do índice de irregularidade internacional ao mercado de carbono**. UFSM, 2023. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/32208>. Acesso em: 25 set. 2024.

KOZINA, A.; RADICA, G.; NIŽETIĆ, S. Analysis of methods towards reduction of harmful pollutants from diesel engines. **Journal of Cleaner Production**, v. 262, p. 0959-6526, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121105>.

NAVA, G.; BARICELO, L. B. **Gestão de custos e viabilidade econômica do cultivo protegido de pêssegos na região de Pelotas**. EMBRAPA, 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1168367>. Acesso em: 20 nov. 2024.

OLIVEIRA, N. K. da S. de.; OLIVEIRA, S. E. de A.; ROCKENBACH, T. S.; SILVA, C. O. da.; SOUZA, M. A. **Gestão de frotas e transporte rodoviário**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Logística) - Escola Técnica do Jaraguá, 2023. Disponível em: <https://ric.cps.sp.gov.br/handle/123456789/13365>. Acesso em: 25 out. 2023.

Sindicato da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios do Rio de Janeiro SINDIREPA. **Sindicato**. Disponível em: <https://www.sindirepabrasil.org.br/>. Acesso em: 15 nov. 2024.

SOARES, D. G.; MONTEIRO, A. M.; SILVA, B. C. F. L.; OLIVEIRA, A. K. M.; NETO, J. F. R.; DALMAGRO, H. J. Descarbonização do transporte de soja no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil: estratégias para uma logística mais sustentável. **Revista Caderno Pedagógico**, v. 20, n. 9, p. 3668-3699, 2023. DOI: <https://doi.org/10.54033/cadpedv20n9-003>.

YIN. R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.