

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

DOUGLAS LEONARDO DE LIMA

**USO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE
CARGAS: AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS EM RELAÇÃO AOS VEÍCULOS
MOVIDOS A ÓLEO DIESEL**

SÃO PAULO

2021

DOUGLAS LEONARDO DE LIMA

**USO DE VEÍCULOS ELÉTRICOS EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE
CARGAS: AVALIAÇÃO DOS BENEFÍCIOS EM RELAÇÃO AOS VEÍCULOS
MOVIDOS A ÓLEO DIESEL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em engenharia de produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato

Coorientador: Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho

SÃO PAULO

2021

Lima, Douglas Leonardo de.

Uso de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas:
avaliação dos benefícios em relação aos veículos movidos a óleo diesel.

/ Douglas Leonardo de Lima. 2021.

92 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE,
São Paulo, 2021.

Orientador (a): Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato.

1. Veículos elétricos. 2. Transporte urbano. 3. Transporte de
mercadorias. 4. Frete. 5. Sustentabilidade.

I. Lucato, Wagner Cezar. II. Título

CDU 658.5

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO
DE

Douglas Leonardo de Lima

Título da Dissertação: Uso de Veículos Elétricos em Sistemas de Transporte de Cargas: Avaliação dos Benefícios em Relação aos Veículos Movidos a Óleo Diesel.

A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Douglas Leonardo de Lima APROVADO.

São Paulo, 17 de dezembro de 2021.

Prof(a). Dr(a) Wagner Cezar Lucato – PPGE – UNINOVE – Orientador



Prof(a). Dr(a). Fábio Ytoshi Shibao – Universidade Ibirapuera – PPGA – Membro externo



Prof(a). Dr(a). Walter Cardoso Sátyro – UNINOVE – Membro interno



DEDICATÓRIA

A Deus, o autor da vida. A Sua palavra é lâmpadas para os meus pés e luz para os meus caminhos, obrigado por toda sabedoria e direção dada nos momentos mais difíceis.

Dedico a minha Mãe Aila Maria de Araujo Lima, responsável pela minha formação como ser humano, agradeço por todo carinho, afeto e apoio que me foi dado. Mãe...esta dissertação é a prova de que todo seu investimento e dedicação valeram a pena!

A minha esposa Valeria Ferreira de Lima, meu grande amor, que além de cuidar da manutenção do lar enquanto eu permanecia ocupada com este projeto, foi capaz de me incentivar todos os dias e suportar os meus momentos de estresse. Grato por me ajudar a realizar este sonho.

A minha filha, Giovanna Ferreira de Lima, meu amor maior, razão do meu viver, muita gratidão no coração por fazer parte da minha vida, e ter o privilégio de ser chamado de Pai...agradeço por todo seu apoio e paciência

AGRADECIMENTOS

A Deus pela oportunidade que me foi dada e tornar um sonho realidade.

Agradeço a Universidade Nove de Julho, por acreditar no meu projeto e apoiar para que esta pesquisa acontecesse por meio de toda a sua excelente estrutura.

Agradeço ao Prof. Dr. Aparecido dos Reis Coutinho por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e com maestria me orientar durante o tempo permitido por Deus.

Agradeço ao Prof. Dr. Wagner Cezar Lucato por dar continuidade às orientações desta dissertação e por compartilhar um conhecimento ímpar em todas as suas aulas no PPGEF.

A todos os meus professores do PPGEF, pela excelência da qualidade técnica de cada um.

Ao meu pai José Donizeti de Lima (*in memoriam*) e a minha Mãe Aila Maria de Araujo Lima que sempre esteve ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha vida, sendo um exemplo de mulher. Mãe te agradeço por todos os ensinamentos!

À minha esposa Valéria Ferreira de Lima (Amor da minha vida) pela compreensão, pelo apoio e paciência demonstrada durante o período do projeto, você é responsável por isso! Essa dissertação é nossa!!!

À minha Filha Giovanna Ferreira de Lima, meu bem maior...razão do meu viver, obrigado pela paciência, apoio e dedicação durante esse período.

Aos colegas do programa de pós-graduação pelo companheirismo nas horas boas e nas horas difíceis.

A Capes PROSUP, que por meio do apoio financeiro permitiu que essa pesquisa avançasse em conhecimento.

A Ana Carolina, assistente do PPGEF sempre pronta a atender e tirar nossas dúvidas. Obrigado!

EPÍGRAFE

*Não há ferrolhos... nem portas...
Que se fechem diante da Tua voz...
Não há doença... nem culpa...
Que fiquem de pé diante de nós...
E a tempestade se acalma...
Na voz Daquele que tudo criou...
Pois Sua palavra é pura...
Escudo para os que nele creem!*

(Carlos A. Moyses)

RESUMO

A busca por escolhas para o transporte de mercadorias que provoque menos impactos ao meio ambiente e à sociedade, tem aumentado no meio acadêmico e empresarial nos últimos anos. De fato, o transporte rodoviário de cargas é um dos setores responsáveis por grande parte das mercadorias transportadas nas metrópoles, além de contribuir de modo importante com a emissão de gases de efeito estufa. Uma das alternativas para tornar este transporte mais eficiente e sustentável consiste na redução do uso de combustíveis fósseis. A literatura vigente apresenta pesquisas sobre os benefícios econômicos, ambientais, vantagens e desvantagens da utilização de veículos elétricos em sistemas de transportes de cargas em grandes centros urbanos. No entanto, não foram encontrados estudos que avaliem os impactos ambientais e econômicos com relação a utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de carga fracionada nas condições apresentadas no Brasil, sendo este aspecto considerado a lacuna desta pesquisa. Assim, a presente dissertação teve por objetivo avaliar os benefícios econômicos e ambientais do uso de veículos elétricos utilizados em sistemas de transporte de cargas fracionadas no Brasil. O desenvolvimento da pesquisa foi na forma de dois estudos de caso realizados na Região Metropolitana de São Paulo, por meio da aquisição de dados in loco, de um caminhão elétrico e outro movido a diesel que operam simultaneamente em uma das maiores distribuidoras de bebidas do Brasil. Assim, os dados relativos ao uso do veículo elétrico foram comparados aos de um veículo equivalente movido a diesel, seguindo roteiros similares de entregas programadas. Os resultados da comparação efetuada mostraram que o veículo elétrico se apresentou mais vantajoso do ponto de vista de uma operação mais econômica e ambientalmente mais favorável. Portanto, este trabalho contribuiu com a teoria na medida em que realizou uma comparação entre um veículo elétrico e outro a diesel, comparação essa ainda inexistente na literatura quando se trata de Brasil. Do ponto de vista prático e de contribuição à sociedade, as conclusões aqui estabelecidas permitem identificar reduções relevantes de custo e de emissão de gases do efeito estufa, com possibilidades de gerar uma operação logística mais sustentável.

PALAVRAS CHAVES: Veículos Elétricos; Transporte Urbano; Transporte De Mercadorias; Frete; Sustentabilidade.

ABSTRACT

The search for choices for the transport of goods that cause less impact on the environment and society has increased in academia and business in recent years. In fact, road freight transport is one of the sectors responsible for a large part of the goods transported in metropolises, in addition to making an important contribution to the emission of greenhouse gases. One of the alternatives to make this transport more efficient and sustainable is to reduce the use of fossil fuels. Current literature presents research on the economic, environmental, advantages and disadvantages of using electric vehicles in cargo transport systems in large urban centers. However, no studies were found that assess the environmental and economic impacts in relation to the use of electric vehicles in fractional load transport systems under the conditions presented in Brazil, and this aspect is considered a gap in this research. Thus, this dissertation aimed to evaluate the economic and environmental benefits of the use of electric vehicles used in fractional cargo transport systems in Brazil. The development of the research was in the form of two case studies carried out in the Metropolitan Region of São Paulo, through the acquisition of in loco data, of an electric truck and another diesel powered by simultaneously operating in one of the largest beverage distributors in Brazil. Thus, data relating to the use of the electric vehicle were compared to that of an equivalent diesel-powered vehicle, following similar schedules of scheduled deliveries. The results of the comparison carried out showed that the electric vehicle was more advantageous from the point of view of a more economical and environmentally more favorable operation. Therefore, this work contributed to the theory insofar as it carried out a comparison between an electric vehicle and a diesel one, a comparison that does not yet exist in the literature when it comes to Brazil. From a practical point of view and of contribution to society, the conclusions established here allow the identification of relevant reductions in costs and emission of greenhouse gases, with possibilities to generate a more sustainable logistical operation.

KEYWORDS: Electric Vehicles; Urban Transport; Transport of Goods; Freight; Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do trabalho.....	22
Figura 2: Atuais medidas dos VUC´s permitidos na RMSP.....	28
Figura 3: Rede de coautoria.....	42
Figura 4: Autores com maior número de publicações.....	42
Figura 5: VUC-c.....	55
Figura 6: VUC-e.....	56
Figura 7: Evolução das emissões de CO, HC, NOX, MP e SO ₂ em CO ₂ -eq.....	65
Figura 8: Emissões de CO, MP, NO _x e SO ₂ em CO ₂ -eq pelo VUC-e.....	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera. .25	
Quadro 2: Restrições de circulação de caminhões na RMSP27	
Quadro 3: Tipos de veículos elétricos e suas características.....34	
Quadro 4: Projetos e métodos de pesquisa segundo Bryman (2016)51	

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1: Número de publicações nos principais periódicos	40
Gráfico 2: Evolução temporal das publicações.....	41
Gráfico 3: Emissões de CO ₂ por kg de óleo diesel	63
Gráfico 4: Emissões de CO ₂ na geração de E.E. consumida pelo VUC-e.....	67
Gráfico 5: Comparativo deslocamento diário médio - VUC-c x VUC-e.....	71
Gráfico 6: Comparativo emissões de CO ₂ - VUC-c x VUC-e.....	74
Gráfico 7: Comparativo de emissões de CO em g/CO ₂ -eq.....	74
Gráfico 8: Comparativo de emissões de NO _x em g/CO ₂ -eq.....	75
Gráfico 9: Comparativo de emissões de SO ₂ em g/CO ₂ -eq.....	76
Gráfico 10: Emissões comparativas das emissões de MP.....	76
Gráfico 11: Comparativo de emissões totais em CO ₂ -eq	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Artigos por base de dados.....	38
Tabela 2: Artigos utilizados após critérios de exclusão	39
Tabela 3: Quantidade de artigos para a revisão sistemática.....	39
Tabela 4: Publicações por continente	41
Tabela 5: Influencia dos VEs nas emissões de GEE	44
Tabela 6: Fatores de emissões de gases na fase PROCONVE P7	60
Tabela 7: Série histórica de emissões de CO ₂ na geração de EE no Brasil.....	61
Tabela 8: Dados do deslocamento do VUC-c na RMSP	62
Tabela 9: Emissões de CO, HC, NOX, MP e SO ₂ do VUC-c em CO ₂ -eq	64
Tabela 10: Emissões Totais de CO ₂ no período.....	66
Tabela 11: Dados do deslocamento do VUC-e na RMSP	67
Tabela 12: Emissões de CO, MP, NO _x e SO ₂ em CO ₂ -eq pelo VUC-e.....	68
Tabela 13: Emissões totais de GEE do VUC-e	69
Tabela 14: Dados do deslocamento dos veículos: VUC-c e VUC-e na RMSP	70
Tabela 15: Custos envolvidos nos deslocamentos dos veículos VUC-c e VUC-e	72
Tabela 16: Emissões de CO, CO ₂ , NO _x , MP e SO ₂ pelo VUC-c.....	73
Tabela 17: Emissões de CO, CO ₂ , NO _x , MP e SO ₂ pelo VUC-e	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

AETC – Autorização Especial de Trânsito de Caminhões

ANP - Agência Nacional de Petróleo

CETSP – Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo

CTP – Custo Total de Propriedade

EV – Electric Vehicles (Veículos Elétricos).

GEE – Gases de Efeito Estufa.

LEZ – Low Emissions Zones. (Zonas de Baixa emissão).

RMSP – Região Metropolitana de São Paulo.

SIN – Sistema Integrado Nacional

TCO – Total Cost Ownership

TUC – Transporte Urbano de Carga

UE – União Europeia.

VEs – Veículos Elétricos.

VEC- Veículo Elétrico de Carga.

VER – Vias Estruturais Restritas

VUC – Veículo Urbano de Carga.

VUC-c – Veículo Urbano de Carga Convencional.

VUC-e – Veículo Urbano de Carga elétrico.

ZERC – Zona Especial de Restrição de Circulação

ZMRC - Zona Máxima de Restrição de Circulação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2. LACUNA E PERGUNTA DE PESQUISA.....	18
1.3. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
1.4. JUSTIFICATIVA DA RELEVÂNCIA DA PESQUISA.....	19
1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	21
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	21
2. REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1. TRANSPORTE URBANO DE CARGAS.....	23
2.2. RESTRIÇÕES AMBIENTAIS AO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS.....	29
2.3. USO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO TRANSPORTE DE CARGAS.....	31
2.4. O USO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS DE CARGAS NA MELHORIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS	36
2.5. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA VOLTADA AO USO DE VE PARA O TRANSPORTE DE CARGAS	37
2.6. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DOS VE PARA TRANSPORTE DE CARGAS EM GRANDES CENTROS URBANOS.....	43
3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	50
3.1. ESCOLHA DO MÉTODO A SER UTILIZADO	50
3.2. CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DOS CASOS	54
3.3. O PROTOCOLO DE PESQUISA.....	57
3.4. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DOS DADOS	58
4. DISCUSSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
4.1. AVALIAÇÃO DO VUC-c.....	62
4.2. AVALIAÇÃO DO VUC-e	66
4.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE VUC-C E O VUC-E.....	70
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	78
REFERENCIAS	80

1. INTRODUÇÃO

Neste Capítulo serão apresentadas a contextualização da pesquisa, o problema de pesquisa, os objetivos, a delimitação do tema e a estrutura do trabalho.

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A deterioração excessiva e os efeitos negativos provocados ao meio ambiente pelos atuais sistemas de transporte nas cidades, podem ser reduzidos por meio da utilização de estratégias que promovam o crescimento sustentável (KIJEWSKA, *et al.*, 2021).

Os atuais modelos de transporte de cargas são ambientalmente sensíveis, bem como dependentes de combustíveis fósseis e, por isso, requerem alternativas de mudanças para redes de distribuição que possam causar menores impactos sobre o meio ambiente (LIN *et al.*, 2014).

No Brasil, as emissões de gases de efeito estufa (GEE) provenientes da queima de combustíveis pelo setor de transporte atingiram 46,3% do total emitido pelos diversos setores produtivos, em que indústria foi responsável pela emissão de 18,8%, seguido pelo setor residencial 4,5% e outros setores (BEN, 2020).

Segundo Xing *et al.* (2016) uma grande quantidade de dióxido de carbono (CO₂), Óxido Nitroso (N₂O), Metano (CH₄) e outros GEE são produzidos após a combustão do óleo diesel, o que resulta na deterioração do clima global e geram uma séria ameaça à sobrevivência humana.

Tendo em vista estes problemas provenientes da queima do combustível, alguns trabalhos foram desenvolvidos ao redor do mundo com o intuito de propor melhorias nas atividades de transportes no meio urbano.

Uma das alternativas que podem contribuir para minimizar os impactos causados ao meio ambiente, devido as emissões de GEE, é a utilização de veículos elétricos (VEs) para o chamado transporte de última milha, ou seja, o trecho final que a mercadoria percorre no modo de transporte, normalmente feito pelo modo rodoviário, antes de chegar ao seu destino (ALTOÉ, 2017; RANIERI, 2018).

A utilização de VEs em sistemas de transporte de carga, têm um grande potencial para reduzir significativamente as emissões de escapamento e a poluição sonora nas cidades, pois VEs são considerados uma tecnologia promissora e uma

solução atraente para um futuro de baixo carbono (IMRE; CELEBI; KOCA, 2021; ZHANG *et al.*, 2021).

Lee *et al.* (2013), mostraram que em situações de tráfego com ciclo de acionamento de paradas frequentes e baixa velocidade média, como o da cidade Nova Iorque nos Estados Unidos, vans elétricas emitem entre 42 e 61% menos GEE e consomem entre 32 e 54% menos energia do que os caminhões movidos a óleo diesel, além de significativa redução do custo total de propriedade.

Do mesmo modo, Lebeau, Macharis & Van Mierlo (2019) afirmam que os VEs podem ser economicamente competitivos na chamada logística urbana aonde o fluxo do tráfego apresenta baixas velocidades com características de anda e para.

Ainda, Quak *et al.* 2016, corroboram que quando utilizados para o transporte de mercadorias, seja em grandes centros urbanos ou em longas e médias distancias, os VEs apresentam menores custos de manutenção e combustível, mais eficiência na operação e bom desempenho ambiental. Por outro lado, a autonomia limitada em comparação aos veículos com motor de combustão interna (VMCI), os longos tempos para o carregamento das baterias e os altos custos de aquisição dos veículos os tornam menos atrativos.

Outros pontos também são observados na utilização dos VEs em sistemas de transportes de cargas, por exemplo, quando avaliados os custos da energia, estes podem ser quase quatro vezes mais baixos do que os dos VMCI, mas os custos de compra podem apresentar valores até três vezes maiores (FENG; FIGLIOZZI, 2013).

Entretanto, para Muñoz-Villamizar *et al.* (2019) a competitividade dos VEs pode aumentar com o tempo, pois quando usados por mais de três anos mostram-se economicamente e ambientalmente mais lucrativos do que os veículos convencionais.

Outro ponto discutido pela literatura sobre os VEs, é o chamado “*total cost ownership – TCO*” (Custo Total de Propriedade – CTP), que pode ser determinado pelo preço de compra do VEs, a quilometragem média diária seguidos do custo do óleo diesel e do consumo de combustível (TAEFI; SUTZ; FINK; 2017).

Do mesmo modo, Ahani, Arantes & Melo (2016) também afirmam que a incerteza no custo de energia e o preço de compra dos VEs, são os parâmetros que têm o maior efeito no CTP, sendo a avaliação das incertezas destas variáveis fatores preponderantes para uma melhor avaliação deste aspecto.

O alcance limitado também é amplamente identificado como uma preocupação significativa por potenciais compradores de VEs utilizados para o transporte de mercadorias (TAEFI; SUTZ; FINK; 2017).

No entanto, na logística urbana este aspecto dos VEs é menos problemático do que no transporte de passageiros, uma vez que esta restrição pode ser controlada pela programação eficiente e ambiente baseado no tempo das cadeias logísticas (LEBEAU *et al.*, 2019).

Além disso, a quilometragem média diária típica na distribuição de bens nas cidades está abaixo do alcance típico de um VEs (EHLER; LOBIG; RISCHKE, 2020; QUAK, *et al.*, 2016; TRUMMER; HAFNER, 2016)

Embora os VEs sejam eficientes e flexíveis em termos de consumo de energia, o tempo necessário para recarga da bateria em comparação com um processo de enchimento do tanque relativamente rápido e a falta de estações de carregamento de bateria em vias públicas e / ou privadas são vistos como desvantagens quando comparados aos VMCI (JUAN *et al.*, 2016; PELLETIER *et al.*, 2018; WU *et al.*, 2020; SULABH *et al.*, 2020).

1.2. LACUNA E PERGUNTA DE PESQUISA

Como se observa, a literatura vigente apresenta pesquisas sobre os benefícios econômicos, ambientais, vantagens e desvantagens da utilização de veículos elétricos em sistemas de transportes de cargas em grandes centros urbanos, entretanto não foram encontrados estudos que avaliem os impactos ambientais, e econômicos com relação a utilização de VEs em sistemas de transporte de carga fracionada nas condições apresentadas no Brasil, sendo este aspecto considerado a lacuna desta pesquisa.

Assim, para gerar conhecimentos teóricos e práticos sobre as vantagens econômicas e ambientais decorrentes da utilização de veículos urbanos de carga nas condições das grandes cidades brasileiras, este trabalho propõe responder à seguinte questão de pesquisa:

Quais os benefícios relacionados à utilização dos veículos elétricos para o transporte de cargas em áreas urbanas no Brasil, quando comparados com a utilização de veículos convencionais movidos a óleo diesel?

1.3. OBJETIVO GERAL E OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral desta pesquisa consiste em avaliar os benefícios econômicos e ambientais relacionados à utilização dos veículos elétricos para o transporte de cargas em áreas urbanas no Brasil, quando comparados com a utilização de veículos convencionais movidos a óleo diesel, uma vez que inexistem na literatura estudos sobre esse tema.

Como objetivos específicos destacam se:

- a) Realizar uma avaliação comparativa, entre um veículo urbano convencionais de cargas (VUC) movidos a óleo diesel, e um veículo elétricos, com relação aos possíveis benefícios ambientais;
- b) Realizar uma avaliação comparativa, entre um veículo urbano convencionais de cargas (VUC) movidos a óleo diesel, e um veículo elétrico, com relação aos aspectos econômicos;

1.4. JUSTIFICATIVA DA RELEVÂNCIA DA PESQUISA

O setor de transporte é o que mais emite GEE no mundo. Segundo dados do órgão *Emission Database for Global Atmospheric Research* (EDGAR, 2020), este setor apresentou um aumento de 78% nas emissões entre os anos 1990-2019, enquanto no Brasil, neste mesmo período o aumento foi de 121%.

Como alternativa para redução das emissões de poluentes, os países desenvolvidos, assim como os países do BRIC (Brasil, Rússia, Índia e China) buscam promover o desenvolvimento e uso de VEs.

Por exemplo, trabalhos feitos por Wu & Zhang (2017) compararam o efeito da utilização de VEs sobre o meio ambiente, em países desenvolvidos com os países emergentes, em que os resultados apresentaram redução das emissões de CO₂. Entretanto, destacaram que a poluição do ar correspondente às emissões de SO₂,

PM₁₀, NO_x, por parte dos VEs estão associadas com a infraestrutura utilizada para a produção de energia elétrica, principalmente em países que são dependentes de combustíveis não renováveis, como carvão mineral, gás natural e óleo combustível.

Neste aspecto, o Brasil se destaca como um dos países que menos emitem poluentes para geração de energia elétrica, atingindo 126g CO₂/kwh gerado, assim como taxas reduzidas de emissões de MP₁₀, SO₂ e NO_x devido a uma matriz energética predominantemente composta por hidrelétricas (BANCO MUNDIAL, 2021).

Nesse contexto, o transporte urbano de cargas tem sido discutido pela literatura científica como importante base para o melhoramento das emissões de GEE, a redução de custos operacionais na cadeia de suprimento e o aumento da competitividade das empresas (GOES et al., 2018).

Nos últimos anos o uso de formas de transporte menos agressivas ao meio ambiente, como (VEs) para entrega de mercadorias em áreas urbanas tem recebido nos países desenvolvidos mais atenção de planejadores urbanos, bem como de empresas privadas lá localizadas (MUSOLINO *et al.*, 2019; RIZET & THU, 2019).

Ainda, as diversificações de estratégias utilizadas para o transporte de cargas em áreas urbanas podem reduzir seus impactos ambientais, os custos operacionais, além de elevar a eficiência das entregas no último trecho percorrido, que geralmente é feito pelo modo de transporte rodoviário (SOUZAa *et al.*, 2018)

Diante deste cenário, tornam-se importantes alternativas que sejam capazes de diminuir esses impactos ambientais, por meio de pesquisas ligadas a academia, bem como pelas empresas e pela sociedade; por exemplo, com a possibilidade da utilização de veículos elétricos em sistemas de transportes de mercadorias (EPL, 2018).

Cabe destacar que para a teoria este estudo justifica-se devido a não terem sido encontrados na literatura estudos de avaliem os benefícios da utilização de VEs para o transporte de cargas fracionadas nas condições Brasileiras.

Para a sociedade e para a prática esta pesquisa se justifica em função das crescentes preocupações com o meio ambiente, tendo como foco a ecoeficiência, em especial no sentido de contribuir com estudos voltados à utilização dos veículos urbanos de carga elétricos (VUC-e).

1.5. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está delimitada na avaliação comparativa feita entre um veículo elétrico urbano de carga (VUC-e) e um veículo convencional movido a óleo diesel (VUC-c), utilizados para entrega de cargas fracionadas, em uma distribuidora de bebidas localizada na Região Metropolitana de São Paulo, operando sob responsabilidade de um operador logístico.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho segue uma estrutura com cinco capítulos, incluindo a Introdução, conforme representado de forma simplificada pela figura 1.

No capítulo 1 são apresentados o contexto no qual o trabalho se insere, a pergunta de pesquisa, os objetivos da pesquisa, bem como a justificativa e relevância dos temas abordados.

No Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico, que procurou um embasamento bibliográfico para compreender os assuntos acerca da pesquisa, por meio de uma revisão bibliométrica e sistemática, e conceitos básicos sobre o transporte urbano de carga, restrições ambientais ao transporte urbano de cargas e o uso de veículos elétricos no transporte de cargas.

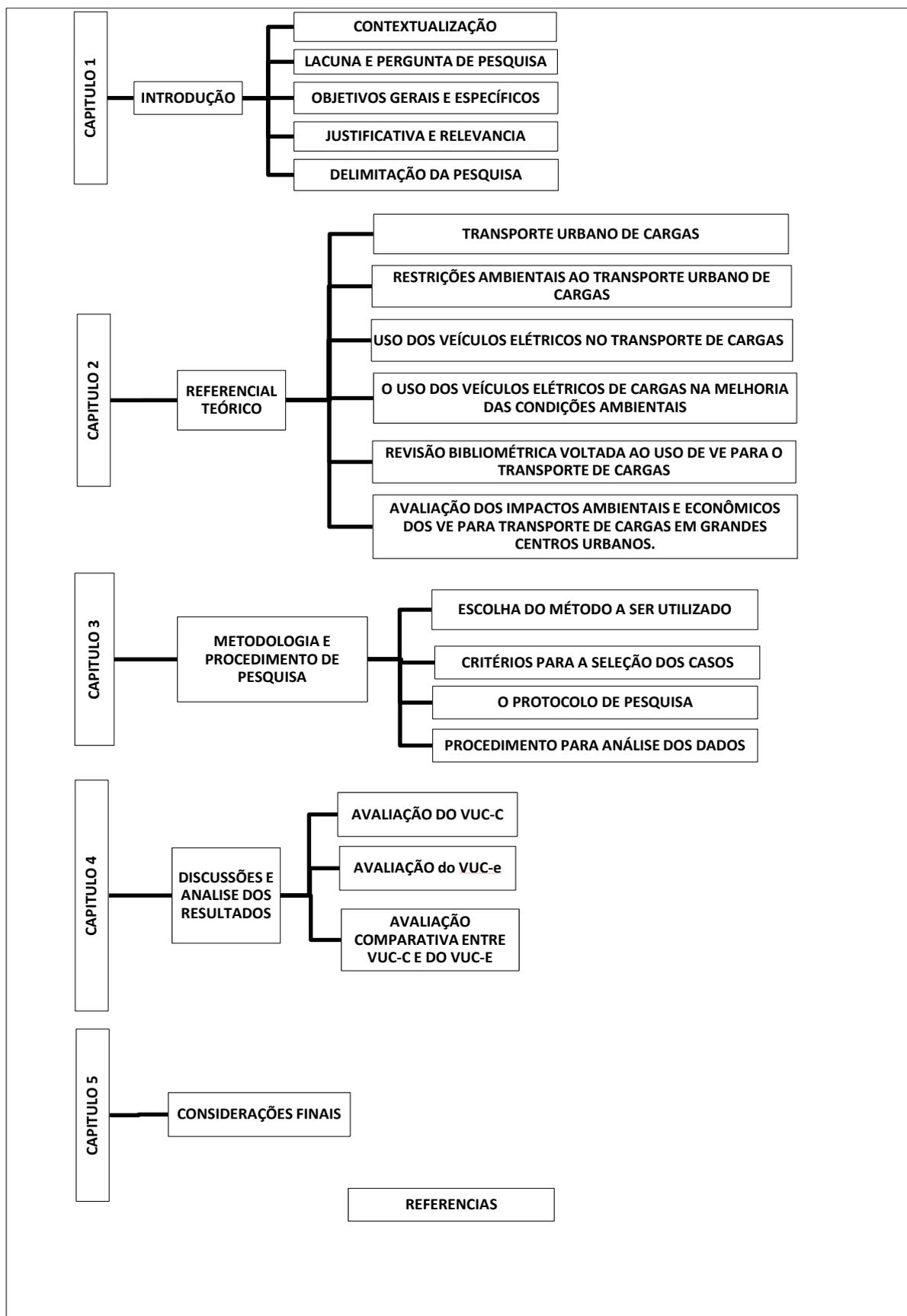
No Capítulo 3 é apresentado o método da pesquisa, descrevendo a escolha do método a ser utilizado, os critérios para seleção dos casos estudados, o protocolo de pesquisa e o procedimento para análise dos dados.

Os resultados são apresentados no Capítulo 4, no qual são discutidos os possíveis benefícios ambientais e econômicos da utilização de veículos elétricos em sistemas de transportes de cargas nas condições brasileiras.

O Capítulo 5 apresenta-se as considerações finais, seguido da apresentação dos principais resultados encontrados pela pesquisa.

Por último, são apresentadas as referências da literatura científica, que foram tomadas como base para elaboração do referencial teórico.

Figura 1: Estrutura do trabalho



2. REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico do presente projeto de pesquisa foi elaborado a partir de pesquisa em literatura científica relacionada ao transporte urbano de cargas, restrições ambientais ao transporte urbano de cargas, o uso dos veículos elétricos no transporte de cargas, o uso dos veículos elétricos de cargas na melhoria das condições ambientais.

2.1. TRANSPORTE URBANO DE CARGAS

O desenvolvimento da tração mecanizada de veículos e locomotivas como parte da revolução industrial, possibilitou o desenvolvimento econômico de muitos países, transformando pequenas cidades em grandes centros urbanos (KNOWLES *et al.*, 2020).

Essa urbanização resultou em uma maior mobilidade dos veículos, devido as constantes alterações das formas que as pessoas consomem os bens e os serviços ofertados pelas empresas, acarretando um significativo aumento da quantidade de viagens no transporte urbano de carga (TUC) (COMI; NUZZOLO, 2016; SOUZA *et al.*, 2020).

Tanto em países desenvolvidos, como nos países em desenvolvimento o TUC desempenha um papel importante para o crescimento econômico das zonas urbanas, garantindo que produtos estejam disponíveis para os compradores nos locais de consumo (KIN *et al.*, 2017; MUÑOZ-VILLAMIZAR *et al.* 2017).

Por outro lado, no ambiente urbano, afeta os índices de congestionamento, contribui com as emissões dos GEE, produz a deterioração da infraestrutura viária, gera poluição sonora, bem como o aumento do número de acidentes (CÁRDENAS *et al.*, 2017; DE OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Nos últimos anos, todos estes adventos causados pelo movimento de cargas, tem aumentado de forma expressiva nas cidades modernas, sendo necessário soluções que minimizem estes impactos causados pelo TUC (RANIERI, *et al.* 2018).

Quando comparado com o transporte coletivo, o número de viagens feitas pelos veículos que transportam carga contribui tanto com o aumento do congestionamento quanto com as emissões de GEE, enquanto o número de viagens feitas pelos veículos

que transportam passageiros aumenta apenas os índices de congestionamento (EWBANK, 2020).

Também, o uso extensivo dos veículos de carga em centros urbanos, são responsáveis por grande parte das emissões de poluentes, como o óxido de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO_2) e Material Particulado (MP) (CETESB, 2020).

Além disso, estudos mostram que a quantidade mais considerável de GEE emitida por cidades, ou grandes áreas urbanas em todo o mundo, são resultado da combustão de combustível fóssil, a principal fonte de energia utilizada para a tração dos veículos no transporte de mercadorias (KARIMIPOUR *et al.*, 2021).

No Brasil, estimativas da CETESB (2020) apontam que 67% das emissões de GEE do estado São Paulo, medidas em $\text{CO}_2\text{-eq}$, provêm de veículos comerciais leves, caminhões leves, semi-leves e médios, em um ambiente com características de tráfego carregado, acionamento e paradas frequentes e baixa velocidade.

Ainda, dentre os principais poluentes considerados indicadores da qualidade do ar na RMSP estão as partículas inaláveis finas ($\text{MP}_{2,5}$), partículas inaláveis (MP_{10}) e fumaça, partículas totais em suspensão (PTS), dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de nitrogênio (NO_2), monóxido de carbono (CO) e o ozônio (O_3) (CETESB, 2018). As características destes gases, suas principais origens e seus efeitos ao meio ambiente são mostrados no quadro 1.

Quadro 1: Fontes, características e efeitos dos principais poluentes na atmosfera.

Poluente	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais ao Meio Ambiente
Partículas Inaláveis Finas (MP2,5)	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias. Faixa de tamanho $\leq 2,5 \mu\text{m}$.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Inaláveis (MP10) e Fumaça	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho $\leq 10 \mu\text{m}$.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), poeira suspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc. Faixa de tamanho $\leq 50 \mu\text{m}$.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua suspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	Gás incolor, e com forte odor. Pode ser oxidado na forma SO ₃ , que na presença de vapor de água, passa rapidamente a H ₂ SO ₄ . É um importante precursor dos sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinarias de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa de celulose e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação.
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	Gás marrom avermelhado, com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (os quais contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas, incinerações.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono (CO)	Gás incolor, inodoro e insípido.	Combustão incompleta em veículos automotores.	
Ozônio (O ₃)	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica.	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de N e compostos orgânicos voláteis.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Fonte: CETESB (2018).

Por conta disso, diminuir as emissões que o sistema de transportes de carga lança no meio ambiente tem sido um assunto fundamental para muitos estudos (RABBANI *et al.*, 2018).

Em especial, o que tem atraído a atenção de muitos pesquisadores é a necessidade de eficiência e sustentabilidade no sistema geral de transporte de carga, principalmente no contexto urbano (PERBOLI; ROSANO, 2019).

Neste sentido, Alimujiang & Jiang (2020), apontam que um dos setores que pode contribuir com a redução das emissões de GEE, é o setor de transportes, por conta dos altos níveis dos poluentes emitidos na atmosfera por esta atividade.

Entretanto, para reduzir as emissões de gases nocivos à saúde e dos GEE emitidos pelo transporte de mercadorias, é preciso melhorias na eficiência energética e mudança para fontes alternativas, principalmente no transporte de cargas fracionadas feito por caminhões (MCKINNON, 2019).

Ainda, estudos baseados na demanda global mostram que o setor de frete precisa de uma série de estratégias de mitigação, incluindo veículos com combustíveis mais limpos para alcançar reduções significativas de CO₂ (MULHOLLAND *et al.*, 2018).

Neste cenário, algumas regiões metropolitanas têm adotado as restrições de acesso a determinadas áreas, frequentemente impostas pelo tamanho e capacidade das ruas, pelas políticas que regem o tráfego urbano, características físicas dos veículos (tamanho e peso dos veículos), a hora do dia (acesso permitido apenas durante janelas de tempo pré-especificadas) ou para a tecnologia do motor dos veículos e o combustível relacionado (gasolina, gás metano, energia elétrica) (PINTO; LAGORIO, 2020).

Provavelmente um dos artifícios mais comuns para gerenciar o acesso de fluxos de carga, tem sido as restrições de acesso por janela de tempo, que limita o período durante o qual os veículos de carga urbana podem acessar e operar em uma determinada área, uma vez que sua introdução costuma ser relativamente barata (MUÑUZURI *et al.* 2005).

No Brasil, as soluções para a logística das cidades se baseiam em ações restritivas a veículos de carga, que são repetidas de uma cidade para outra a cidade, mostrando à falta de competência das autoridades em criar um plano eficiente que atenda às demandas do TUC (DIAS *et al.*, 2018).

Entretanto, o fluxo de cargas na cidade não pode ser interrompido, caso contrário a economia entraria em colapso, assim, quando os caminhões de grande porte são proibidos nas cidades, a única opção real que as transportadoras têm para continuar no mercado é enviar a mercadoria em caminhões menores, contribuindo para mais congestionamentos, acidentes e poluição (OCAMPO-GIRALDO, 2019).

Por exemplo, em SP o decreto nº 48.338, de 10 de maio de 2007, estabeleceu normas para o trânsito de caminhões e para operações de carga e descarga em

estabelecimentos situados no Município, definiu as zonas com restrições para o tráfego de caminhões, além de instituir as propriedades dos veículos urbanos de cargas (VUC) (SP, 2007). As características destas áreas que restringem a circulação de caminhões bem como seus acrônimos são apresentados no quadro 2.

Quadro 2: Restrições de circulação de caminhões na RMSP

Acrônimo / Nome	Características e restrições
ZMRC - Zona Máxima de Restrição de circulação	Concentra centros de comércio e serviços e abrange aproximadamente 102,0 km ² - uma área maior do que 20 Municípios mais baixa da RMSP. No ZMRC, a circulação de caminhões é proibida às sextas-feiras, das 5h às 21h, e aos sábados, das 10h às 14h. A circulação dos VUC's é permitida em período integral
ZERC - Zona especial para restrição de circulação	A restrição do caminhão ocorre o tempo todo. A circulação dos VUC's é permitida em período integral
VER - Vias Estruturais Restritas	Existem restrições em dois tipos de períodos - a maior parte do dia e apenas nos horários de pico. Circulação de VUCs sujeita as normas da PORTARIA Nº 137/18 das Secretaria Municipal de Transporte.

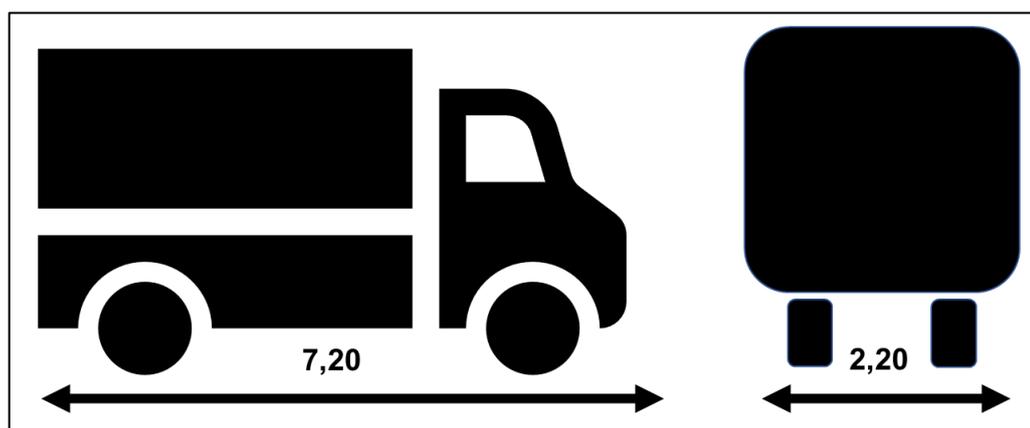
Fonte: Adaptado de Ewbank (2020).

A partir da vigência deste decreto no ano de 2008 os VUC's ganharam protagonismo por possuírem benefícios na circulação nas zonas de restrição (CETSP, 2018).

Os VUC's são caminhões de menor porte, adequado para realizar as operações de entrega em áreas urbanas, principalmente nas regiões centrais das grandes cidades. Eles apresentam características como o baixo impacto na fluidez do trânsito em áreas urbanas e de acordo com a companhia de engenharia de tráfego do município de São Paulo (CETSP) são liberados por período integral na zona máxima de restrição desde que devidamente cadastrados (CETSP, 2018).

Em São Paulo, conforme o decreto 56.920/2016¹, para que um veículo seja classificado como VUC, devem atender conjuntamente as seguintes características: (I) largura máxima: 2,20m (dois metros e vinte centímetros); (II) comprimento máximo: 7,20m (sete metros e vinte centímetros) e (III) idade máxima de 15 anos excluído o ano de fabricação. Uma ilustração deste veículo é apresentada na figura 2.

Figura 2: Atuais medidas dos VUC's permitidos na RMSP



Fonte: Retirado do banco de imagens do Office 365. Adaptado de CETSP (2016).

Ainda, a portaria 031/16 SMT.GAB e a portaria 137/18 SMT.GAB em seu Art. 18, autorizam a circulação do VUC por período integral na ZMRC, ZERC e nas VER dos §§ 2º, 3º e 4º do artigo 2º destas portarias, mediante AETC (autorização especial de trânsito para caminhões) (CETSP, 2016; 2018).

Estas medidas de restrições do trânsito de caminhões adotadas nas grandes metrópoles como na cidade de São Paulo, são tomadas com o objetivo de melhorar a fluidez do trânsito, o congestionamento e contribuir com a diminuição das emissões dos GEE lançados na atmosfera pela atividade de transporte (VIEIRA, *et al.*, 2021).

Entretanto, a restrição a circulação de caminhões maiores em algumas áreas dos grandes centros das cidades, resulta no aumento do congestionamento, devido a utilização de mais veículos menores para o transporte das cargas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019)

Ainda, os VUC's são ideais para chegar as áreas mais densas das grandes metrópoles, que possuem características diferenciadas por questões sociais e

¹ O decreto 56.920/2016, revogou o decreto nº 48.338/2007, designando a Secretaria Municipal de Mobilidade e Transportes (SMT) quanto as características dos VUC, que por meio da portaria 031/16 da SMT alterou as medidas do comprimento máximo dos VUC's de 6,30m para 7,20m (SP.GOV, 2016; CETSP, 2016).

divisões de classes, atendendo a demanda em diferentes bairros que também possuem diferentes características geográficas (DE OLIVEIRA *et al.*, 2019).

Neste sentido, Ewbank (2020) corrobora que nos grandes centros urbanos os VUC's são fundamentais para o funcionamento da economia, por conta do grande número de entregas diárias nas áreas sujeitas as restrições de tráfego.

Além disso, por conta das menores quantidade de volumes e peso das cargas, há evidências de que pequenos varejistas são mais propensos a gerar mais movimentação de carga, sendo os VUCs veículos eficientes para atividades com estas propriedades (MARCUCCI; GATTA, 2021).

Este fato ocorre pela necessidade de as empresas atenderem muitos pequenos pedidos (em volume e peso) que devem ser coletados e / ou entregues a muitos clientes (MACHADO, *et al.* 2021).

Por exemplos, o TUC para entregas diárias na RMSP é baseado em caminhões, veículos leves e motocicletas em uma frota de veículos de carga que já representou 9,5% dos caminhões e 10,8% de todas as vans do Brasil (EWBANK *et al.*, 2020; GUERIN, *et al.*, 2021).

Apesar das vantagens apresentadas pelos VUC's, para as entregas das mercadorias na chamada última milha logística, eles também acarretam o aumento da quilometragem percorrida pelos veículos, fenômeno observado em Tóquio como também em Paris (SAKAI *et al.*, 2015; DABLANC; RAKOTONARIVO, 2010).

Por fim, especialistas Brasileiros entendem que é necessário investir em pesquisas para maior compreensão da logística de frete urbano, discutindo até a possibilidade de alterar as atuais dimensões dos veículos urbanos de carga, com o objetivo de minimizar os impactos negativos causados por eles buscando uma eficiência maior para os operadores logísticos (GUSMÃO; RIBEIRO, 2020).

2.2. RESTRIÇÕES AMBIENTAIS AO TRANSPORTE URBANO DE CARGAS

Existem amplas evidências científicas de que a logística de frete urbano impacta dimensões ambientais, sociais e econômicas de uma cidade (CURIEL-ESPARZA *et al.*, 2016).

Em certas áreas urbanas com altos níveis de poluição, o processo gradual de redução de emissões às vezes é considerado muito lento. Isso levou várias cidades a introduzir ou considerar as zonas de baixa emissão (*Low emissions Zones* - LEZ),

onde os veículos que circulam nestas áreas devem atender a determinados padrões (BORJESSON; BASTIAN; ELIASSON, 2021).

A ideia por trás do *LEZ* é reduzir a poluição do ar relacionada ao tráfego nos centros urbanos, por meio das restrições de circulação a caminhões pesados, ônibus, em alguns casos veículos comerciais leves, carros particulares movidos a diesel e gasolina e até motocicletas (TARTAKOVSKY *et al.*, 2021)

As *LEZ* proíbem veículos que não cumprem os padrões de emissão nos centros das cidades, tendo como principal objetivo reduzir a poluição.

Atualmente as *LEZ* estão espalhadas por todo o globo (cerca de 250 cidades em 16 países) sendo mais adotadas no continente Europeu, onde já foram implementados em 41 cidades de 9 países (TARTAKOVSKY *et al.*, 2021).

Por exemplo, em 2019, a cidade de Milão na Itália, introduziu 129 km² de zonas de baixa emissão, restringindo nestas áreas a circulação de carros a diesel de padrão Euro 4² ou inferior (CLARS, 2019; MARCUCCI *et al.*, 2020).

A adoção das *LEZ* na cidade Leipzig na Alemanha, impedindo a passagem de veículos pesados e caminhões a diesel pela cidade foi apontado como um dos principais fatores para redução de concentrações de *Black Carbon*³ (LOSCHAU *et al.*, 2017).

No entanto, fora da Alemanha, este tipo de restrição de circulação, focada apenas em veículos pesados movidos a óleo diesel produziu resultados geralmente ambíguos (HOLMAN *et al.*, 2015).

Neste sentido, Boogaard *et al.* (2012) não encontraram reduções substanciais em concentrações de poluição do ar após a implementação do *LEZ* voltado para caminhões em cinco cidades da Holanda, novamente devido a fatores como condições meteorológicas ou estratégias mais genéricas.

A maioria das cidades da região metropolitana de Randstad na Holanda e na região de Reno-Ruhr na Alemanha, introduziram as *LEZ* no ano de 2008, em que Randstad começou com *LEZ* para caminhões a diesel abaixo da norma Euro 4, enquanto o Reno-Ruhr introduziu *LEZ* para todos os veículos a diesel e gasolina.

² Padrão Europeu de Emissões (EURO IV, 2005-2008) norma que disciplina as emissões de veículos novos comercializados na União Europeia. Fonte: ICCT, 2012.

³ O *Black Carbon* (BC) é um dos principais componentes do MP_{2,5} e suas fontes predominantes são queima de combustíveis fósseis (principalmente diesel) para transporte, combustíveis sólidos para indústrias, queima residencial de madeira e carvão, queima a céu aberto de biomassa (agricultura, floresta e vegetação em geral) e centrais elétricas que utilizam óleo pesado ou carvão (Boogaard *et al.*, 2012).

Na região de Randstad, a cidade de Amsterdã expandiu sua *LEZ* em 2018 incluindo veículos leves movidos a diesel mais antigos e scooters / ciclomotores feitos antes de 2011.

Ainda, um estudo de uma *LEZ* para veículos pesados em Amsterdã na Holanda, no período de 2007 a 2010, apontou uma queda substancial de 4,9% para níveis de NO_2 , 5,9% para os níveis de NO_x e 5,8% para PM_{10} (PANTELIADIS *et al.*, 2014).

Outros Benefícios observados pelas *LEZ* é que normalmente elas proporcionam grandes reduções em viagens, emissões e ruído, especialmente quando combinados com incentivos ou outras políticas que encorajam a mudança para veículos com combustíveis alternativos (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2020).

No entanto, nem sempre as reduções das emissões são alcançadas, por exemplo, após 3 anos de implantação da *LEZ* de Londres não foram identificadas melhorias da qualidade do ar, por isso outras cidades na Europa optaram por outros tipos de proibições para veículos de carga com o objetivo de resolver seus próprios problemas de poluição (CITYLAB, 2017).

Além disso, à medida que restrições de acesso são impostas aos veículos da logística urbana, como os caminhões leves e os caminhões pesados, nas regiões de emissão zero, ocorre o aumento nos quilômetros percorridos por veículos (BOK; TAVASSZY; THOEN, 2020).

Todas as *LEZ* na Europa afetam caminhões com mais de 3,12 toneladas de peso bruto e a maioria dos ônibus (normalmente, aqueles com mais de 4,45 toneladas) e em alguns casos vans, carros e motocicletas também podem ser atingidos (HOLGUÍN-VERAS *et al.*, 2020).

2.3. USO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS NO TRANSPORTE DE CARGAS

Os VEs não são novos e ao longo do século 20, vários modelos de VEs foram produzidos, mas nenhum foi completamente adotado pelos consumidores, em função da concorrência dos veículos movidos a combustíveis líquidos, derivados da indústria do petróleo, e que foram produzidos em grande escala a partir do começo do século XX (ROUMBOUTSOS *et al.* 2014).

Desde então, foram várias as tentativas, frustradas, para tenta reviver os VEs, como nas décadas de 1960 e de 1970. Por outro lado, na década de 1990, os

problemas relacionados a emissões de gases no meio ambiente, levaram as principais montadoras a uma nova tentativa.

Na década de 1990, já eram tratados assuntos ligados aos impactos do tráfego rodoviário na Europa, e que as utilizações de estratégias articuladas seriam necessárias para manter o crescimento do setor de transporte, dentro dos limites impostos por um desenvolvimento sustentável (MAURIZIO, *et al.*, 1997).

Neste sentido, Rienstra e Nijkamp (1998) estudaram como os carros poderiam contribuir com o meio ambiente, se utilizados em ambiente de transporte urbano. Desta experiência os autores concluíram que a substituição de carros convencionais por carros elétricos poderia contribuir muito para os objetivos da política ambiental nas cidades.

Nos anos 2000, práticas associadas a utilização de veículos elétricos passaram a ser pensadas em alguns locais na Europa. Por exemplo, em Mônaco foi restringida a entrada de grandes caminhões nos centros urbanos, com o objetivo de minimizar os impactos destes veículos no tráfego e incentivar o uso de veículos elétricos no transporte de cargas (CRAINIC, 2004).

Ainda nos anos 2000, Muñuzuri *et al.* (2005), destacaram uma compilação das soluções ou iniciativas que podem ser implementadas pelas administrações locais, a fim de melhorar a entrega de cargas em ambientes urbanos, das quais destacam-se acesso gratuito durante a noite para todos os tipos de veículos, incluindo aqueles usados para entregas de carga e o uso de veículos especiais (por exemplo, elétricos e silenciosos).

Também, Zanni & Bristow (2010) analisaram as emissões históricas e projetadas de CO₂ de frete rodoviário na cidade de Londres e exploraram o efeito potencial de mitigação de um conjunto de políticas de transporte de carga e soluções logísticas, nos quais se encontram veículos elétricos, de hidrogênio ou de célula de combustível.

Ainda, LipmSmith (2010) após a apuração de um aumento de 181% das emissões de CO₂ do setor de transportes da Irlanda, no período entre 1990–2007, propôs uma transição para veículos movidos a eletricidade, seja para veículos BEV (*Battery electric vehicles*) ou PHEV (*Pluggable hybrid electric vehicle*), que oferecem potencial para reduções significativas nessas emissões.

Lipman & Delucchi (2010), também destacaram que os VEs apresentam emissões mais baixas de GEE quando comparados aos veículos que funcionam com combustíveis renováveis; mas em contrapartida os VEs apresentam custos mais

elevados com relação ao valor de aquisição, manutenção, até mesmo da energia elétrica em várias partes do planeta, que é gerada a partir de combustíveis fósseis.

Segundo Edwards *et al.* (2010) empresas varejistas de comércio *online* e empresas de entrega em domicílio do Reino Unido, também aumentaram o uso de veículos elétricos para aumentar a eficiência de CO₂ de suas operações logísticas, no sentido de obter uma vantagem ambiental.

Nos anos mais recentes, devido as exigências mais severas voltadas a redução das emissões de GEE, a utilização dos veículos elétricos apresentou um novo patamar e um horizonte mais próximo de ser efetivada. Contudo, a aceitação pelo mercado é lenta e as projeções variam para o médio e longo prazo (ROUMBOUTSOS *et al.*, 2014; TAEFI, 2017).

Os VEs podem ser utilizados no transporte coletivo de passageiros e no transporte de mercadorias, tendo em vista o foco na logística da cidade em termos de custos de inovação, que promove implantação em larga escala na esfera do planejamento de transporte; sendo que a logística da cidade é considerada como a “última milha” do transporte de mercadorias (ALTOÉ, 2017).

Segundo Nanaki (2015), os veículos elétricos são classificados como: elétrico híbrido, elétrico a bateria e tecnologias elétricas de células de combustível. O quadro 3 mostra suas principais características.

Quadro 3: Tipos de veículos elétricos e suas características

TIPOS DE VEICULOS ELÉTRICOS	CARACTERÍSTICAS
Veículos elétricos híbridos (HEVs - <i>Hybrid electric vehicles</i>)	Utilizam um motor elétrico e um motor auxiliar de combustão final para impulsionar o veículo.
Veículos elétricos híbridos plugáveis (PHEVs - <i>Pluggable hybrid electric vehicles</i>)	Utilizam uma bateria que pode ser carregada fora da placa, conectando-a grade e que lhe permite viajar por diversos quilômetros, exclusivamente com eletricidade.
Veículos elétricos a bateria (BEVs – <i>Battery electric vehicles</i>)	Utilizam uma bateria de tração, de grande porte e potência, para impulsionar o veículo. A bateria fornece energia para propulsão por meio de um motor elétrico de tração, bem como para alimentação de todos os sistemas e acessórios dos veículos.
Veículos elétricos com célula de combustível (FCEVs - <i>Fuel cell electric vehicles</i>).	São dispositivos de conversão de energia, configurados para substituir motores de combustão por hidrogênio, e complementar as baterias em várias aplicações.

Fonte: Adaptado de Nanaki (2015).

Neste sentido, a utilização de VEs no transporte de mercadorias nos centros urbanos, está ligada as tentativas de reduzir o impacto ambiental no transporte, assim como novos procedimentos de gestão de tráfego, gestão do uso da terra e infraestrutura pública e restrições de acesso também contribuem nas reduções de emissões de GEE (DABLANC, 2007; DABLANC *et al.*, 2013).

Nos últimos anos as vantagens dos VEs são reconhecidas por pesquisadores, empresários do setor de transporte, ao mesmo tempo em que muitas autoridades locais também formulam políticas que visam promover a utilização de VEs no frete urbano (RIZET; THU, 2019).

Os VEs são atualmente vistos como uma das medidas mais importantes para reduzir o impacto negativo do transporte no meio ambiente (BASSO; KULCSÁR; SANCHEZ-DIAZ, 2021).

Quando utilizados no transporte de cargas, os VEs, podem contribuir com as reduções das emissões dos GEE e de outros gases nocivos provocados pela atividade de transporte, tornando a distribuição de bens mais limpa (CAMILLERI; DABLANC, 2017; PERBOLI; OSANO, 2019).

Apesar dos benefícios que apresentam, o número de VEs de carga em frotas comerciais ainda está muito abaixo do seu potencial. Por exemplo, no ano de 2018, o segmento VEs plug-in representou apenas 0,4% de todos os veículos nas estradas do mundo (IWAN *et al.*, 2019).

Veículos elétricos de carga (VEC) diferem de VEs de transporte particular no que diz respeito aos requisitos de infraestrutura, tamanho do veículo e tecnologias etc. Embora a decisão de compra para VEs seja pessoal, a compra de VEC requer uma decisão coletiva sob consideração de muitos aspectos nas operações logísticas (IMRE; CELEBI; KOCA, 2021).

Estudos mostram que os VEC podem ser economicamente competitivo em ambientes de tráfego com baixas velocidades, paradas frequentes e viagens diárias (LEE *et al.*, 2013; LEBEAU; MACHARIS; VAN MIERLO, 2019).

Entretanto, algumas barreiras dificultam sua ampla adoção no transporte de mercadorias, como os altos níveis de CTP (TAEFI, 2017).

Por exemplo, enquanto os custos de energia dos VEC são quase quatro vezes mais baixos do que caminhões a diesel, seus custos de compra podem ser três vezes maiores (FENG; FIGLIOZZI, 2013).

Além disso, flutuações nos preços do petróleo, e as incertezas na tarifa de eletricidade podem ser um desafio a ser superado na aquisição dos VEC (MORGANTI; BROWNE, 2018).

O alcance limitado também é amplamente identificado como uma preocupação significativa por compradores potenciais de VEs, além do alcance limitado, a autonomia do veículo pode ser afetada pelas condições meteorológicas e comportamento de direção (IMRE; ÇELEBI; KOCA, 2021; MARTINS-TURNER, 2020).

Neste cenário, Quak *et al.* (2016) sugerem que novas habilidades serão requeridas para os gerentes de operação lidarem com as possíveis incertezas dos problemas com manutenção, o atendimento ao cliente não confiável por parte dos fabricantes de veículos, os valores incertos de revenda, bem como os longos tempos de carregamento das baterias.

A vida útil dos VEC, também é discutida por Davis & Figliozzi (2013) que sugerem uma idade superior a 10 anos, e neste sentido Muñoz-Villamizar, *et al.*, (2019) corroboram que após 3 anos de uso os VEC são economicamente e ambientalmente mais lucrativo do que os veículos convencionais.

Grande parte dos estudos sobre VEs estão relacionadas as estratégias de substituição e avaliação de custos bem como questões relacionadas a roteirização, dado que o uso VEs no frete urbano está na fase de operação e melhoria (HE; HASSIS, 2019).

2.4. O USO DOS VEÍCULOS ELÉTRICOS DE CARGAS NA MELHORIA DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS

Há um interesse crescente no potencial de mudar para zero ou quase zero as emissões de GEE da poluição dos caminhões utilizados nos sistemas TUC (GIULIANO *et al.*, 2021).

As oportunidades mais valorizadas para reduzir os efeitos negativos da entrega de mercadorias nos centros urbanos dizem respeito tanto ao uso de VEs para realizar a distribuição quanto à introdução de centros de distribuição que incentivem o uso de veículos comerciais leves (NAPOLI *et al.*, 2021).

Neste sentido, o projeto SMILE (*SMart green Innovative urban Logistics Models for Energy efficient mediterranean cities Project*) combinou o uso de triciclos elétricos e terminais de transbordo (ou Centros de Consolidação Urbana) para a entrega de pacotes e pequenas remessas na última milha nas cidades de Barcelona e Valencia na Itália. Os resultados deste estudo mostraram que esta estratégia poderia reduzir as emissões de CO₂ em aproximadamente 2ton. por ano (NAVARRO, *et al.*, 2016).

Do mesmo modo, Bandeira *et al.* (2019) apontam que veículos leves de carga utilizados no transporte de mercadorias na logística urbana, reduzem as emissões de CO₂ provocados pela atividade de transporte.

Por conta dos benefícios ambientais da utilização de veículos leves de carga, o Reino Unido está eletrificando agressivamente a frota destes modelos de veículos, com uma meta ambiciosa de proibir a venda de todos os novos carros com motor de combustão interna até 2030, ao mesmo tempo, em que a rede elétrica passa por uma rápida descarbonização, abrindo o caminho para o uso mais eficiente de veículos elétricos do ponto de vista ambiental (RAUGEI; KAMRAN; HUTCHINSON, 2021).

Do mesmo modo, Rizza *et al.* (2020) afirmam que a eletrificação de 5% da frota de veículos leves de carga na cidade de Torino, tem um potencial para redução das concentrações de NO₂ em 52%, PM₁₀ em 35% e PM_{2,5} em 49%.

Ainda, caminhões elétricos com células de combustível resolveriam os desafios das emissões de GEE e da poluição do ar em áreas urbanas no estado federal da Renânia do Norte-Vestfália, na Alemanha (BREUER *et al.*, 2021).

Neste sentido, Giordano *et al.* (2018) por meio da avaliação de dois veículos Iveco Daily de 5 ton, com características semelhantes, um movido a bateria e outro movido a óleo diesel, constataram que os VEC reduzem as emissões de CO₂ em 93-98% e as emissões de outros poluentes atmosféricos, como o NO_x, PM_{2,5}, PM₁₀, SO₂ em 85–99%.

As empresas de entrega de última milha estão investindo em tecnologia para tornar suas frotas mais eficientes e olhando atentamente para o mercado de veículos comerciais leves elétricos, a fim de atender aos limites cada vez mais rigorosos das emissões poluentes (NAPOLI *et al.*, 2021).

Apesar das preocupações que os VEC apresentam em relação ao peso do veículo a duração da bateria, e a falta de assistência rápida da mecânica em caso de reparo, há uma percepção positiva em relação a sua contribuição na abordagem das questões ambientais de transporte (TEOH *et al.*, 2018; FIORI; MARZANO, 2018; LONG *et al.*, 2016).

2.5. REVISÃO BIBLIOMÉTRICA VOLTADA AO USO DE VE PARA O TRANSPORTE DE CARGAS

A Bibliometria é um método que serve como uma espécie de catálogo que possibilita identificar as origens dos conceitos existentes, indicar correntes teóricas usadas para investigar um tema e levantar os métodos científicos utilizados em trabalhos anteriores (CHUEKE; AMATUCCI, 2015).

Ainda, a revisão bibliométrica procura compreender a maioria dos pontos relacionados à verificação do impacto dos artigos revisados, orientando o leitor, por intermédio de informações gerais, específicas, de longo prazo e imediatas (SENGER, *et al.*, 2020).

Neste sentido, a revisão bibliométrica desta pesquisa, se baseou na análise de dados, coletados com o apoio de ferramentas básicas, bem como a coleta de amostras representativas de uma população, esperando que os resultados obtidos com os dados coletados, representem a imagem da população alvo da pesquisa.

Para isso, foram feitas buscas nas bases de dados *Emerald*, *Science direct*, *Scopus*, *Scielo*, *Wiley library*, *Proquest* e *Taylor & Francis*, utilizando cinco palavras chaves “*Transport*”, “*Urban*”, “*Electric vehicles*”, “*Freight*” e “*environment*”, sempre em conjunto (todas as cinco).

A busca descrita resultou nos artigos por base de dados conforme tabela 1.

Tabela 1: Artigos por base de dados

BASE DE PESQUISA	QUANTIDADE
Taylor & Francis	36
Science Direct	46
Scopus	107
Wiley on lin Library	125
Proquest	35
Scielo	0
Emerald	54
TOTAL	403

Fonte: Elaboração própria

O próximo passo, foi a exclusão dos artigos que não se mostraram relevantes para a pesquisa, para isso os artigos foram lidos e seguiram os seguintes critérios de exclusão:

- a) O artigo faz abordagem sobre a utilização de veículos elétricos para o transporte de mercadorias?
- b) O artigo aborda questões ambientais e econômicas da utilização de veículos elétricos para transporte de mercadorias?
- c) O artigo versa sobre questões ambientais, e econômicas referente a utilização de veículos elétricos no transporte de mercadorias em grandes centros urbanos?

Os artigos que tiveram ao menos uma resposta positiva para qualquer uma das perguntas, foram escolhidos para leitura conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2: Artigos utilizados após critérios de exclusão

BASE DE PESQUISA	QUANTIDADE	EXCLUIDOS	ESCOLHIDOS PARA LEITURA
Taylor & Francis	36	26	10
Science Direct	46	31	15
Scopus	107	70	39
Wiley on line Library	125	95	30
Proquest	35	26	9
Scielo	0	0	0
Emerald	54	23	31
TOTAL	403	271	132

Fonte: Elaboração própria

Após a leitura dos 132 artigos selecionados, ainda foi identificado que 101 deles tratavam sobre assuntos diferentes daqueles considerados importantes para esta pesquisa, como por exemplo revisões bibliométricas da literatura sobre o uso de veículos elétricos e estratégias de roteirização de veículos de cargas movidos a baterias.

Com isso, para a revisão sistemática desta pesquisa entendeu-se que estes artigos se mostraram irrelevantes, por não abordarem de maneira específica sobre os benefícios ambientais e econômicos da utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de carga. Assim para a revisão sistemática foram considerados 31 artigos, conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3: Quantidade de artigos para a revisão sistemática

ATIVIDADE	QUANTIDADE
Artigos baixados	403
Artigos repetidos	-22
Artigos excluídos	-249
Artigos irrelevantes para revisão sistemática	-101
Artigos utilizados na revisão sistemática	31

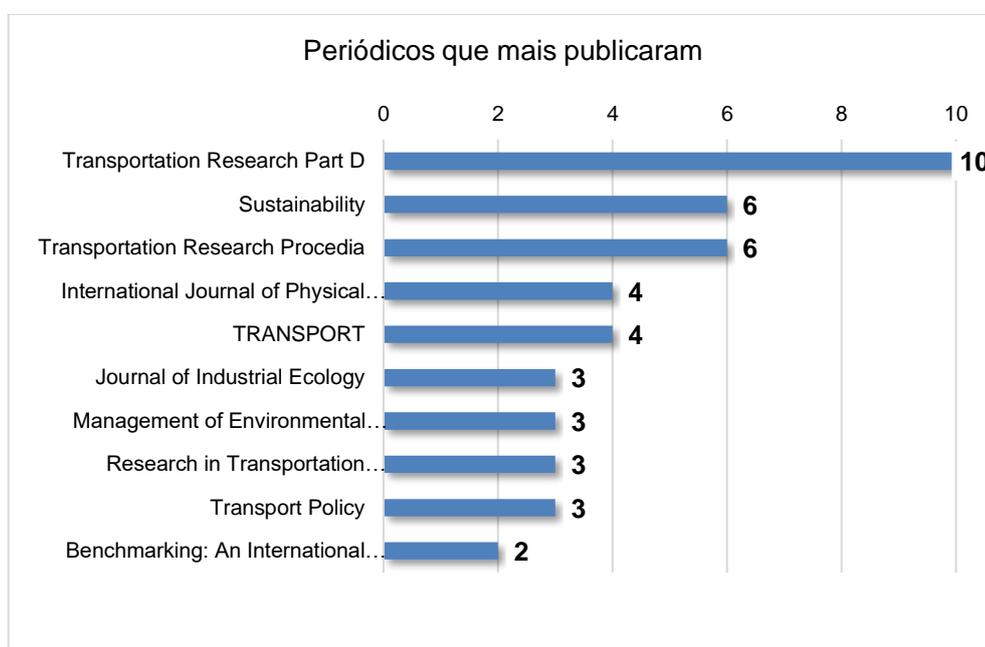
Fonte: Elaboração Própria

Ainda, a partir dos resultados da tabela 2 e utilizando as recomendações de Araújo (2006, p. 15), a qual sugere que os periódicos devem ser listados com o

número de artigos de cada um, em ordem decrescente e com soma parcial foi feita a identificação dos principais periódicos que publicaram sobre o assunto, conforme apresentado no gráfico 1.

Nota-se que o maior número de publicações ocorreu nos periódicos *Transportation Research Part D*, *Sustainability* e *Transportation Research Procedia* com 22 artigos, uma vez que essas revistas concentram suas edições em assuntos relacionados ao tema desta pesquisa.

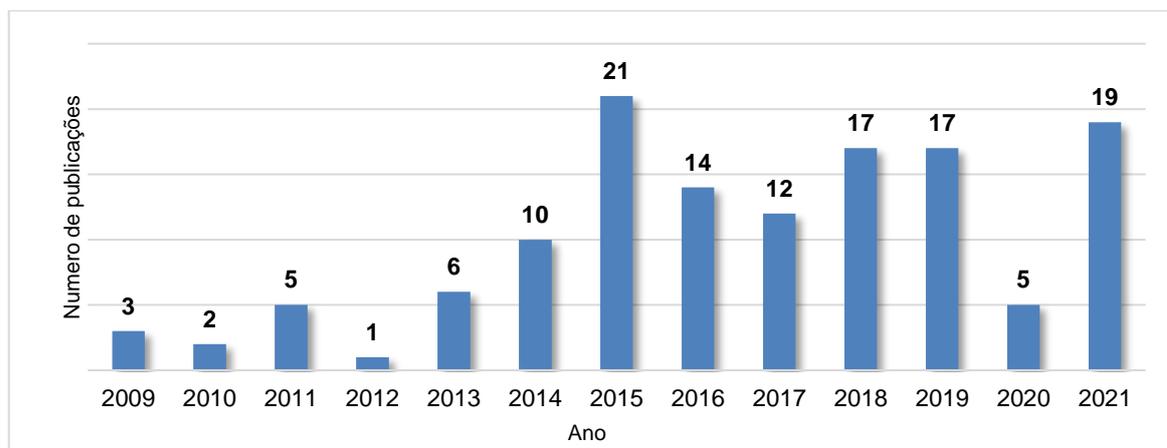
Gráfico 1: Número de publicações nos principais periódicos



Fonte: Elaboração própria

Ainda, o gráfico 2 mostra a evolução temporal com base nos critérios descritos para seleção e exclusão de artigos, em que se pode observar que o maior número de artigos publicados foi de 21 no ano de 2015, enquanto em 2016 foram 14 publicações, em 2017 foram 12 publicações, nos anos de 2018 e 2019 foram 17 publicações, 5 publicações no ano de 2020 e 19 publicações no ano de 2021.

Gráfico 2: Evolução temporal das publicações



Fonte: Elaboração própria

Ainda, foi feita a identificação dos continentes em que aconteceram as publicações. A tabela 4 mostra os continentes onde os estudos ocorreram, em que a Europa é o detentor do maior percentual de publicações (70%), seguida pela América (16%), Ásia (11%), Oceania (2%) e África com (1%).

Tabela 4: Publicações por continente

Continente	Quantidade	Porcentagem
Europa	92	70%
América	21	16%
Asia	15	11%
Oceania	3	2%
África	1	1%
Total	132	100%

Fonte: Elaboração própria

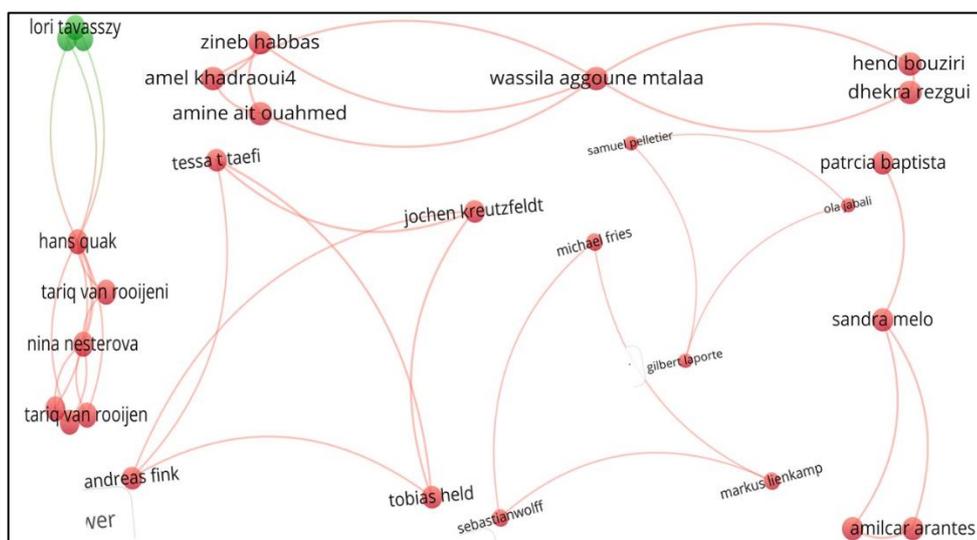
É provável que o fato do continente Europeu apresentar o maior número de artigos publicados nesta área, esteja relacionado com o objetivo de limitar emissão de combustível de exaustão nesta área em 31% até 2030 (ACEA, 2020).

Ainda, a Europa apresenta preocupação com as emissões de GEE no meio ambiente, de modo que em 2019, a emissão de gases de escape no setor de transporte representou menos de 30% do valor total das emissões (IEA, 2019).

Quanto a autoria dos trabalhos, observa-se como destaque o número de publicações da autora Tessa t. Taefi, com 6 publicações, seguida pelo autor Hans Quak com 4 publicações. As demais publicações ficaram da seguinte forma: Kinga

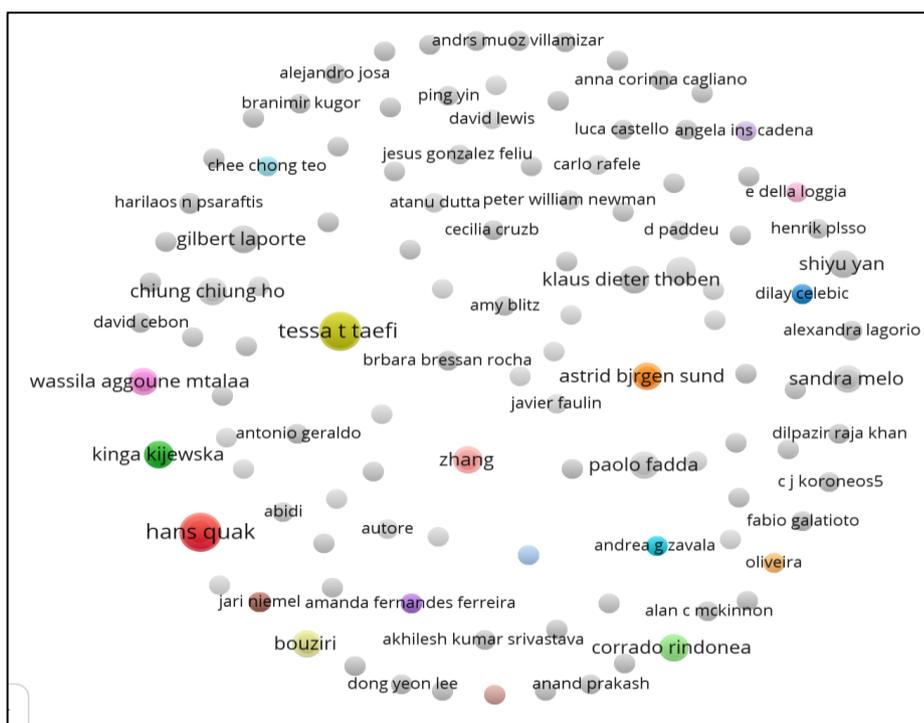
Kijewskaa com 3 publicações; sendo os autores com 2 publicações: Paolo Fadda, Klaus Dieter Thoben, Molin Wang, Seyed Mostafa Mirhedayathian, Shiyu Yan, Gilbert Laporte, Ola Jabali, Samuel Pelletier, Sandra Melo, Wassilla Aggoune Mtalla, seguido os demais autores com 1 publicação. A Figura 3 mostra a rede de coautoria e a Figura 4 os autores com maior relevância de publicação.

Figura 3: Rede de coautoria



Fonte: Elaboração própria - feito com o software Vosviewer (2021)

Figura 4: Autores com maior número de publicações



Fonte: Elaboração própria - feito com o software Vosviewer (2021).

Ressalta-se que, a pesquisa bibliométrica foi feita por meio da consulta manual às bases de dados e o software Vosviewer somente foi utilizado para formatar os gráficos das Figuras 3 e 4 com base no resultado da busca manual.

2.6. AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS E ECONÔMICOS DOS VE PARA TRANSPORTE DE CARGAS EM GRANDES CENTROS URBANOS.

Existem várias iniciativas importantes em países da UE (União Europeia), apoiando o desenvolvimento de infraestruturas voltadas ao uso de veículos elétricos, para uso pessoal e comercial. Essas iniciativas têm motivações diferentes, mas principalmente contribuir para diminuir o uso de energia de origem fóssil nos transportes e, portanto, reduzir as emissões de CO₂ (QUAK; NESTEROVA, 2014).

Por exemplo nos EUA, Velazquez *et. al* (2015) sustentaram que devido às menores emissões de CO₂, modos de transporte não motorizados são preferíveis aos modos de transporte motorizados.

Também, um estudo feito em Cingapura, avaliou estratégias de oportunidade de carregamento das baterias durante os intervalos e mudanças de turno, durante a atividade de carregamento e descarregamento ou durante a condução em rodovias, podem reduzir entre 23% e 39% as emissões de CO₂ (TEOH, *et al.*, 2018).

O projeto CITYFREIGHT realizou uma análise comparativa em 14 cidades de sete países Europeus, com diferentes cenários de distribuição de carga urbana, avaliando os impactos socioeconômicos e ambientais, em que dentre as soluções apresentadas, aparece o uso de VEs para entrega de mercadorias nos centros urbanos. A tabela 5, mostra como o uso de VEs pode influenciar as emissões, o barulho, os danos a infraestrutura, a economia e a eficiência logística das operações de transporte em Bruxelas, LA Rochelle e Genova.

Tabela 5: Influência dos VEs nas emissões de GEE

	Cenário Implementado	Cidade	Emissões	Barulho	Dano a infraestrutura	Segurança	Economia	Eficiência logística (transporte)
Bélgica	Distribuição e armazenamento em centros urbanos com veículos elétricos	Bruxelas	+	+	+	+	--	-
França	Entrega de mercadorias em centro urbano usando carro elétrico	LA Rochelle	+	+	0	+	--	+
Itália	Distribuição urbana com veículos elétricos	Genova	++	+	+	+	--	-

++ muito positivo para o critério considerado; + positivo; 0 positivo / negativo; - negativo; -- muito negativo; NI nenhuma informação. Fonte: Adaptado de Monami, *et al.* (2016)

Com isso, é possível observar que o uso de VEs nas situações avaliadas, contribui com a queda das emissões de GEE e com a diminuição dos ruídos. Por outro lado, os impactos a infraestrutura a economia e a eficiência na logística de distribuição são aspectos que ainda apresentam desafios a serem superados.

Do mesmo modo, um estudo feito na cidade de Cambridge no Reino Unido, mostrou que a utilização de VEs nas operações de entrega em domicílio, no transporte de ônibus, e nas operações de coleta de lixo, pode resultar em uma redução de 635t/CO₂ de 2018 até 2050 (NICOLAIDES; CEBON; MILES, 2019).

Contudo, mesmo os veículos híbridos sendo mais atrativos economicamente como também para reduzir os tóxicos do ar, os caminhões elétricos pesados movidos a bateria reduzem ao máximo as emissões e apresentam melhores resultados em um cenário de maior utilização (GIULIANO *et al.*, 2021).

Ainda, as emissões de caminhões e vans totalmente elétricos tem potencial para eliminar a poluição do ar local, o que é benéfico, mas as emissões das usinas de geração de energia elétrica movidas a combustíveis fósseis podem comprometer todos os benefícios alcançados nas reduções das emissões de escapamento (VLEUGEL; BAL, 2018).

Neste sentido, Sikova & Bergh (2019) avaliaram as emissões globais de gases de efeito estufa devido ao uso direto e indireto de carvão, petróleo e gás pelas atividades econômicas e de transporte, calculando emissões locais em zonas de circulação na cidade de Barcelona na Espanha. Os resultados mostraram que em um cenário aonde todos os veículos são elétricos e toda a eletricidade é renovável, as emissões globais (locais) são menores do que em um cenário onde todos os veículos são movidos a gasolina e toda a eletricidade é baseada em combustível fóssil.

Neste sentido, Dul & Chokchai (2021), corroboram que em um cenário de alta utilização de VE no transporte rodoviário dos países da *Greater Mekong Sub-region* (sub-região do Grande Rio Mekong)⁴ pode reduzir em 69,75% as emissões de GEE, devido ao alto poder de mitigação dos VEs no transporte rodoviário.

Também, a implantação de VEs comercial em frotas de logística de varejo de médio porte, pode produzir reduções de emissões de GEE entre 58% e 96%. Mesmo uma solução de custo otimizado produz emissões mínimas com economias de 57% com o pior mix de eletricidade (SCHIFFER *et al.*, 2020).

Do mesmo modo, nos EUA em uma avaliação das emissões de NO_x de 50 veículos pesados de diferentes setores e tecnologias de motor, os VEs reduziram em 65% se comparadas aos veículos movidos a óleo diesel, indicando que a implementação generalizada de tecnologia avançada e veículos de combustível alternativo poderia fornecer reduções importantes e um caminho para cumprir as metas de qualidade do ar na Califórnia e em outros lugares (MCCAFFERY *et al.*, 2021).

Do mesmo modo que nos EUA, a alta penetração de VEs de carga na UE pode levar a uma redução de emissões totais de CO₂ em mais de 3% até 2030. Para emissões de poluentes, como NO_x e MP a redução seria igual ou até maior. No caso da MP, isso pode se traduzir em reduções nas concentrações de quase 2% em várias áreas urbanas até 2030. Políticas de suporte cuidadosamente elaboradas podem ajudar a garantir que o potencial de baixa emissão dos VEs de carga seja totalmente aproveitado na UE (TSAKALIDIS *et al.*, 2020).

Também, rotas mais curtas em operações descentralizadas no transporte de cargas, cenário ideal para o uso de VEs devido a autonomia limitada, também podem

⁴ A sub-região do Grande Rio Mekong, compreende o Camboja, a República Popular da China (especificamente a província de Yunnan e a região autônoma de Guangxi Zhuang), a República Democrática do Laos, Mianmar, Tailândia e Vietnã. Fonte: <https://greatermekong.org/about>

reduzir as emissões de CO₂, de modo que operações centralizadas resultam em menores despesas logísticas e terrestres (MARTÍNEZ *et al.*, 2021).

Ainda, a promoção dos VEs podem ser uma medida eficiente para controlar a poluição das emissões veiculares em Xangai. Estimativas apontam que com a promoção de VEs, incluindo veículos de carga e de passageiros, as emissões de CO, NMVOC, NO_x, SO₂, PM_{2.5}, PM₁₀, CH₄ e CO₂ diminuirão em 24,61%, 26,45%, 4,94%, 24,73%, 21,16%, 22,51%, 28,87% e 24,60% respectivamente entre 2018 e 2025 (Hu, *et al.*, 2021).

Do mesmo modo, Rizet & Thu (2019), avaliaram a substituição de veículos a diesel por VEs, comparando um VEs de 2ton e outro de 6ton, aonde o de maior capacidade de carga, apresentou maiores benefícios na mitigação de CO₂, (140 MtCO₂e) em um período de vinte anos.

Também, ajustar os modos de transporte e aumentar a aplicação de eletricidade são as duas medidas mais eficazes para alcançar os cobenefícios da redução CO₂ e emissões de poluentes atmosféricos no setor de transporte da cidade de Cantão na China (JIAO *et al.*, 2020).

Em estudos feitos na Dinamarca, Alemanha, Holanda, Suécia e Reino unido, Taefi *et al.* (2013), avaliaram o custo total de propriedade (CTP), comparando os veículos convencionais, para transporte de mercadorias com os veículos movidos a eletricidade, no qual os resultados apresentaram as vantagens e desvantagens dos VEs nas esferas ambiental, social e econômica.

Esta pesquisa mostrou que na esfera ambiental, os veículos elétricos reduzem as emissões de GEE e excesso de barulho. Em relação aos fatores técnicos de processos logísticos, os veículos elétricos ficam limitados a faixas de quilometragens, entretanto em ambientes de *Stop And Go* (anda e para) mostram-se mais eficientes. Por fim, a respeito dos fatores financeiros a pesquisa mostrou que os altos custos de investimento dos VEs são vistos como desvantagens, a menos que a operação possa atingir uma quilometragem diária alta. Cabe ressaltar que os países que participaram deste estudo oferecem diferentes subsídios e isenções para combater as desvantagens de custo.

Neste mesmo sentido, Lee *et al.* (2013) concluíram que em condições de trânsito lento, de anda e para (*stop and go*), o custo total de propriedade mediano dos caminhões elétricos é 22% menor, quando comparados aos caminhões movidos a combustão.

Ainda, Muñoz-Villamizar (2019) avaliaram a operação de transporte com dados reais da cidade de Bogotá na Colômbia, em cenários de curto e médio prazo, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental. Os resultados deste estudo sugerem que os veículos elétricos são mais lucrativos, economicamente e ambientalmente, em períodos de utilização maiores que 3 anos.

Ainda, na esfera econômica, várias estratégias são propostas, mas é evidente que o custo de aquisição dos veículos é o maior desafio a ser superado para uma utilização plena (MIRHEDAYATIAN; YAN, 2018; MONAMI, *et al.*, 2018; PELLETIER *et al.*, 2018).

Entretanto, por meio de uma revisão sistemática da literatura, Bandeira *et al.* (2019) apontaram que o uso de triciclo elétrico é uma alternativa mais viável do ponto de vista econômico, ambiental e social se comparados com os veículos elétricos leves de carga, pois apresentam uma economia de custos de 27,9%, em comparação com os VEs leves de carga, possivelmente devido aos altos valores de aquisição.

Além disso, incentivos fiscais, estratégia de maior uso, frota homogênea, bem como modelos baseados em pesquisa operacional são propostos para minimizar este lado negativo dos veículos elétricos (REZGUI *et al.*, 2019).

Ainda, um grande teste de campo com VEs de médio porte na Alemanha, mostrou que uma baixa quilometragem diária é a estratégia mais econômica para o uso de VEs em cenários com altos preços e alto consumo de energia se comparado com óleo diesel a preços altos e alto consumo (TAEFIA; STÜTZC; FINK, 2017).

Também, Pelletier, Jabali & Laporte (2018) por meio de um modelo matemático, mostraram que os custos totais do VEs no transporte de cargas são sempre mais baixos com a bateria maior, principalmente por causa da economia gerada nos custos de degradação deste item.

Por outro lado, o custo de transporte por tonelada para os caminhões elétricos a bateria que usam carregamento rápido e baterias menores tende a melhorar à medida que a capacidade de carga útil destes veículos aumenta (NYKVIST; OLSSON, 2021).

Em concordância, Scorrano *et al.* (2021) afirmam que em distâncias diárias abaixo de 93 km VEs leves de carga, são convenientes em relação aos seus homólogos a diesel. No entanto, com incentivos financeiros e regulatórios, direção 100% urbana, a maioria dos modelos comparados no estudo são competitivos em relação a motores a diesel e a gasolina.

Do mesmo modo, em entregas urbanas caracterizadas por movimentos frequentes de anda e para, VE são competitivos do ponto de vista dos custos, mas incentivos ainda são necessários para sua adoção (PATELLA *et al.*, 2021).

Também, por meio da customização integrada e tamanho da frota, otimização da propulsão do veículo, roteirização e infraestrutura, VEs pesados a bateria, poderiam competir fortemente contra seus homólogos convencionais movidos a combustão (GHANDRIZ *et al.*, 2021).

Ainda, para obter mais veículos elétricos na composição de uma frota mista, o tempo de vida útil da bateria deve aumentar, e isso pode ser alcançado através da otimização das estratégias de carregamento (AL-DAL'AIN; CELEBI, 2021).

Também, ao usar VEs na distribuição de mercadorias, é necessário planejar razoavelmente suas rotas com base nas condições reais (por exemplo, rede de tráfego urbano, janela de tempo do cliente, consumo de energia e capacidade da bateria de VEs e estações de carregamento públicas) para evitar racionalmente períodos de tempo de congestionamento e reduzir o custo de distribuição (ZHAO *et al.*, 2020).

Feitas estas considerações, a partir da análise dos artigos selecionados para a revisão sistemática, foi possível observar que muitos deles citam que a utilização de veículos elétricos para o transporte de mercadorias, contribui com a queda das emissões de GEE lançados na atmosfera.

Ainda, destaca-se o aumento das publicações no campo de pesquisa da utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas, em periódicos com fatores de impacto significativo nos últimos anos, reforçando a importância de alternativas aos atuais sistemas utilizados no transporte de mercadorias.

Além disso, esta pesquisa também identificou um vasto campo que ainda pode ser pesquisado aqui no Brasil, pois não foram identificados estudos nos âmbitos de políticas de incentivo fiscal ao uso de veículos elétricos, viabilidade econômica da utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas fracionadas, redução das emissões de GEE nestes sistemas, bem como impactos sociais, ambientais e econômicos em sistema de transporte de mercadorias que utilizam veículos elétricos.

Possíveis lacunas foram identificadas a respeito destas questões, mais especificamente sobre o que diz respeito a utilizações de caminhões elétricos no Brasil.

Assim, estes dados reforçam a importância do desenvolvimento de estudos na atualidade e em pesquisas futuras.

Por último, destaca-se que não foram localizados/identificados estudos em relação aos aspectos, ambientais e econômicos, sobre a utilização dos veículos elétricos para transporte de mercadorias na região metropolitana de São Paulo. Com isso é possível observar que há uma lacuna para pesquisa a ser feita referentes aos VEs para transporte de cargas na RMSP.

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Neste capítulo, será apresentada a metodologia utilizada no presente estudo.

3.1. ESCOLHA DO MÉTODO A SER UTILIZADO

Tendo em vistas as considerações feitas até agora, do ponto de vista metodológico, a natureza exploratória do trabalho aqui proposto pode ser caracterizada como revisão bibliográfica e estudo de caso. Dessa forma, o estudo a ser desenvolvido possibilitará conclusões aplicáveis somente aos casos estudados.

Neste sentido, buscando um aprofundamento das questões relacionadas sobre os benefícios ambientais e econômicos da utilização de VEs empregados em sistemas de transportes de cargas fracionadas, propõe-se desenvolver uma pesquisa qualitativa do tipo exploratório em razão de:

- a) possibilitar a ampliação da familiaridade do pesquisador com o assunto pesquisado, pois segundo Marconi & Lakatos (2017, p.188), uma das finalidades dos estudos exploratórios é “aumentar a familiaridade do pesquisador com o ambiente, fato ou fenômeno para a realização de uma pesquisa futura mais precisa”.
- b) a complexidade do conhecimento sobre o fenômeno estudado – Marconi e Lakatos (2017) sugerem que pesquisas complexas sejam desenvolvidas utilizando-se estudos exploratórios. Desse modo, apesar de muitos trabalhos terem sido desenvolvidos ao redor do mundo, buscando revelar os benefícios ambientais e econômicos da utilização de VEs aplicados no transporte de mercadorias (LEE *et al.*, 2013; PATELLA *et al.*, 2021; TAEFI *et al.*, 2013; 2017; IWAN *et al.*, 2019; KIJEWSKA *et al.*, 2021) as descobertas sobre esse tema ainda estão distantes de permitir que conclusão sejam estabelecidas, principalmente nas condições apresentadas no Brasil.
- c) o trabalho aqui proposto não pretende ser um estudo definitivo – Como se procurará apenas verificar os possíveis benefícios da utilização de VEs no transporte de cargas fracionadas, em específico na RMSP, a utilização de um estudo exploratório é recomendado como um passo inicial (MARCONI; LAKATOS, 2017).

Ainda, para determinar o método mais adequado, a afirmação de que se pretende desenvolver uma pesquisa exploratória não é suficiente. Com isso, um conjunto de possíveis métodos e projetos de pesquisa que podem ser utilizados nos estudos exploratórios é apresentado por Bryman (2016), sendo considerados como a estrutura global e a orientação geral de uma investigação. O quadro 4 mostra os métodos de pesquisa que envolvem as possíveis técnicas para a coleta dos dados.

Quadro 4: Projetos e métodos de pesquisa segundo Bryman (2016)

Projetos de Pesquisa	Métodos de Pesquisa
Experimentos	Questionário autopreenchido
<i>Survey</i>	Entrevista estruturada
Pesquisa qualitativa	Observação participativa
Estudo de caso	Entrevista semiestruturada
	Observação estruturada
Pesquisa-ação	Simulação
	Pesquisa bibliográfica

Fonte: Bryman (2016).

A primeira e mais importante condição para se escolher o projeto de pesquisa a ser adotado é o tipo de questão que se busca responder, sendo o estudo de caso o mais utilizado para projetos com questões que demandam explicações do tipo “como” e “porque” certos fenômenos ocorrem (YIN, 2017).

Neste sentido, este estudo procura verificar *como* avaliar os possíveis benefícios ambientais e econômicos da utilização de VEs utilizados em um sistema de transporte de cargas fracionadas.

Ainda, o estudo de caso pode ser definido como uma pesquisa empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro de um contexto do mundo real, quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes, e na qual múltiplas fontes de evidências são usadas (YIN, 2017).

Do mesmo modo, Gil (2019, p.63) corrobora que “o estudo de caso se caracteriza por ser um estudo profundo e exaustivo de um ou poucos casos, permitindo-se amplo e detalhado conhecimento, em que a maioria das pesquisas definidas desta forma, são de natureza qualitativa”. Neste sentido, Cauchick-Miguel

(2018), afirma que esta abordagem é uma das mais utilizadas na engenharia de produção e gestão de operações tendo sua utilização também nos periódicos nacionais desta área.

Com relação ao método, deve-se considerar que os estudos de casos que se propõem analisar nesta pesquisa irão verificar como se desenvolve os benefícios ambientais e econômicos da utilização de VEs para o transporte de cargas em comparação com veículos homólogos movidos a óleo diesel.

A princípio, essa investigação poderia ser feita por meio de afirmações de um gestor de frota ou um executivo que melhor descrevessem os aspectos ambientais e econômicos dos VEs aplicados em sistemas de transporte de cargas (questionário autopreenchido).

Porém, para a adequada qualificação da pesquisa em questão, o questionário autopreenchido, apresenta algumas limitações e desvantagens, conforme descrito por Marconi e Lakatos (2017) como:

- a) a impossibilidade de garantir que seu preenchimento será efetivamente realizado,
- b) a possibilidade de respostas inadequadas decorrentes da má compreensão, por parte dos informantes, das questões que serão formuladas,
- c) o desconhecimento das circunstâncias em que foram preenchidos torna difícil o controle e a verificação e
- d) a impossibilidade de se garantir que o escolhido para a pesquisa foi realmente quem a respondeu, o que pode falsear o resultado obtido.

Do ponto de vista prático, os benefícios dos VEs para o transporte de cargas, envolve detalhes operacionais que abrangem diversas áreas funcionais da empresa: projetos, custos, gestão de frota, roteirização etc. Assim, dificilmente uma única pessoa na organização pesquisada teria conhecimentos detalhados suficientes para responder com propriedade todos os requisitos incluídos no modelo.

Tal fato faz com que seja muito complicado identificar *a priori* as pessoas na organização que deveriam receber o questionário para preenchimento.

Pelas mesmas razões, seria praticamente impossível ter controle sobre a circulação do questionário na empresa pesquisada, o que aumentaria muito as chances de não o ter adequadamente preenchido, tendo em vista ainda que alguns

dados de um dos casos correm em segredo industrial, prejudicando a qualidade do levantamento feito.

Por estas limitações, a pesquisa de campo que se pretende desenvolver propõe utilizar a entrevista semiestruturada como o método de coleta de dados a ser empregado para verificação dos benefícios dos VEs utilizados no transporte de mercadorias.

Neste aspecto, Bryman (2016) considera que a utilização da entrevista semiestruturada é o método de coleta de dados preferido para as pesquisas do tipo qualitativo, pois possibilita deixar o entrevistado à vontade para abordar as questões em discussão, minimizando as restrições às suas considerações.

Também, a entrevista semiestruturada é especialmente adequada quando se deseja manter a máxima flexibilidade para possibilitar a obtenção de informações em qualquer direção que pareça apropriada como decorrência do que estiver sendo obtido durante a entrevista (PATTON, 2015).

Do mesmo modo, Marconi e Lakatos (2017) também reconhecem a vantagem desse método para os estudos qualitativos a medida em que o pesquisador tem:

- a) liberdade de repetir questões em diferentes momentos da entrevista, para confirmar informações consideradas duvidosas,
- b) possibilidade de formular perguntas de maneiras distintas, para garantir uma melhor compreensão do ponto pesquisado pelo entrevistado
- c) oportunidade de elaborar perguntas adicionais, consideradas necessárias para aprofundar uma abordagem ou esclarecer pontos importantes para o assunto investigado.

Também, Bryman (2016) afirma que, embora o método de pesquisa entrevista semiestruturada não exija a elaboração prévia de um questionário, para garantir que todas as informações relevantes sejam adequadamente obtidas, deverá ser produzido um *aide-mémoire* para orientar o desenvolvimento dos contatos pessoais que serão mantidos junto às fontes pesquisadas, evitando que tópicos importantes para a pesquisa acabem não sendo perguntados.

3.2. CRITÉRIOS PARA A SELEÇÃO DOS CASOS

Cauchick-Miguel (2018) destaca que uma das primeiras tarefas no planejamento de um estudo de caso é a escolha do(s) caso(s) no que diz respeito as quantidades e tipos.

Também, Yin (2017) afirma que a replicação lógica aplicada nos estudos de casos deve ser distinta da lógica amostral de levantamentos e qualquer utilização da lógica amostral para estudos de casos deve ser evitada. Dessa forma, a lógica da escolha deve ser a replicação, pois o estudo de caso não deve ser usado somente para avaliar a incidência do fenômeno, ele deve cobrir tanto o fenômeno quanto o seu contexto.

Neste sentido, para “replicação literal”, que assume resultados similares dos diversos casos estudados, seria suficiente realizar o estudo com dois ou três casos. Já para “replicação teórica”, que assume resultados contrários, mesmo antes da realização do estudo, mais de quatro casos deverão ser considerados (YIN, 2017)

Feitas estas considerações, a pesquisa empírica que se propõe desenvolver irá investigar os benefícios ambientais e econômicos dos VEs empregados em sistemas de transportes de cargas fracionadas quando comparados com os veículos movidos por motores de combustão interna. Embora possa haver pequenas diferenças entre alguns aspectos do ambiente em que os objetos estudados operam, a avaliação comparativa dos impactos ambientais e econômicos não chega a caracterizar resultados “contrários” como destacados por Yin (2017). Por essa razão, a pesquisa que aqui se propõe desenvolver irá utilizar a estratégia de replicação literal conforme proposta por Yin (2017).

Para a escolha dos casos, Patton (2015) recomenda a utilização de casos que sejam “amostras com conteúdo” (*purposeful sampling*), ou seja, casos dos quais o pesquisador possa retirar grande quantidade de informações relevantes sobre os problemas de importância central para a pesquisa que se desenvolve.

Ainda, Marconi e Lakatos (2017) indicam, que o tipo de caso escolhido depende do problema que se procura estudar. Entretanto, ressalta-se que nos estudos exploratórios, casos que apresentem contrastes mais visíveis ou possuem características salientes são mais úteis, pois num trabalho exploratório a percepção de pequenas diferenças tende a ser difícil.

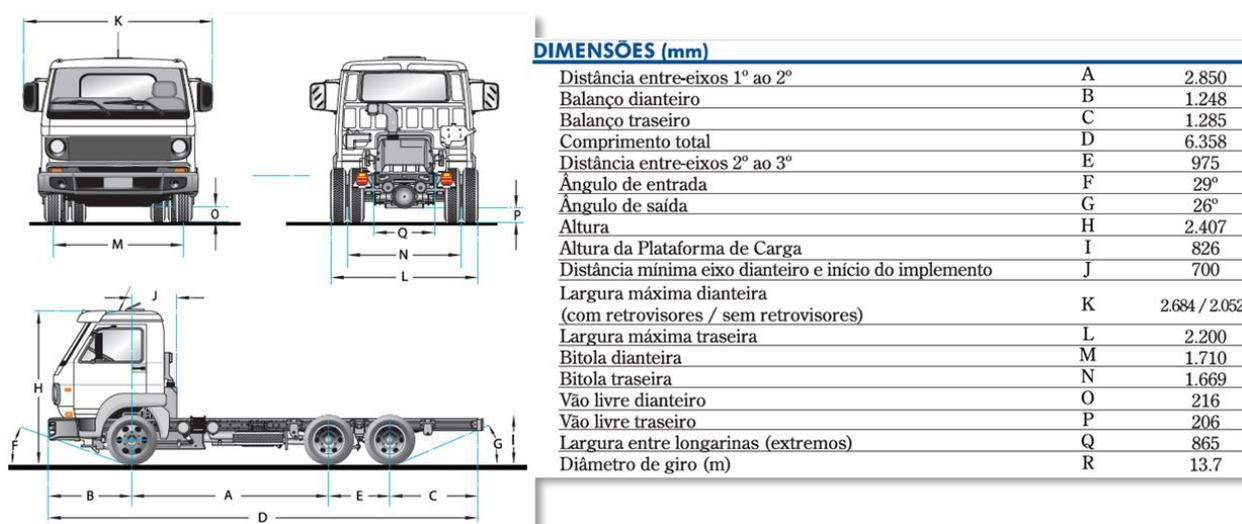
Também, comumente pesquisadores encontram problemas críticos no acesso as organizações detentoras das informações e mesmo quando esse acesso é conseguido, as restrições normais das pessoas em contribuir de maneira franca com o pesquisador precisam ser consideradas.

Neste sentido, um critério fundamental a ser adotado na identificação dos veículos selecionados para os estudos dos casos que serão desenvolvidos como parte da pesquisa será o acesso às informações (Bryman, 2016).

Assim, em busca de uma análise mais precisa, foi selecionado um veículo convencional (VUC-c) de características técnicas e operacionais semelhantes ao VEs (VUC-e,) para avaliação e comparação dos dados, a fim de mensurar os resultados dos benefícios ambientais e econômicos de cada um deles, cujos perfis gerais são:

- ❑ **Caso A** – O veículo VUC-c possui tração com configuração 6x2, sendo com 6 rodas, em que 2 rodas são tracionadas; conta com 1 eixo de rodagem simples na dianteira e eixo duplo na traseira e com rodagem dupla. A tara é de 3.850 kg, com um PBTC (peso bruto total combinado) de 13.200 kg, resultando assim em uma capacidade de 9.350 kg de carga útil. O motor é de 4 cilindros, com potência de 160 CV ou 119 KW à 2.600 rpm e torque de 600Nm. Uma imagem ilustrativa do VUC-c é apresentada conforme a figura 5.

Figura 5: VUC-c



Fonte: Adaptado de Icavel (2020)

Para a avaliação do VUC-c, foi feita a coleta dos dados no período de julho a dezembro de 2019 e posteriormente de fevereiro a outubro de 2020, pois devido

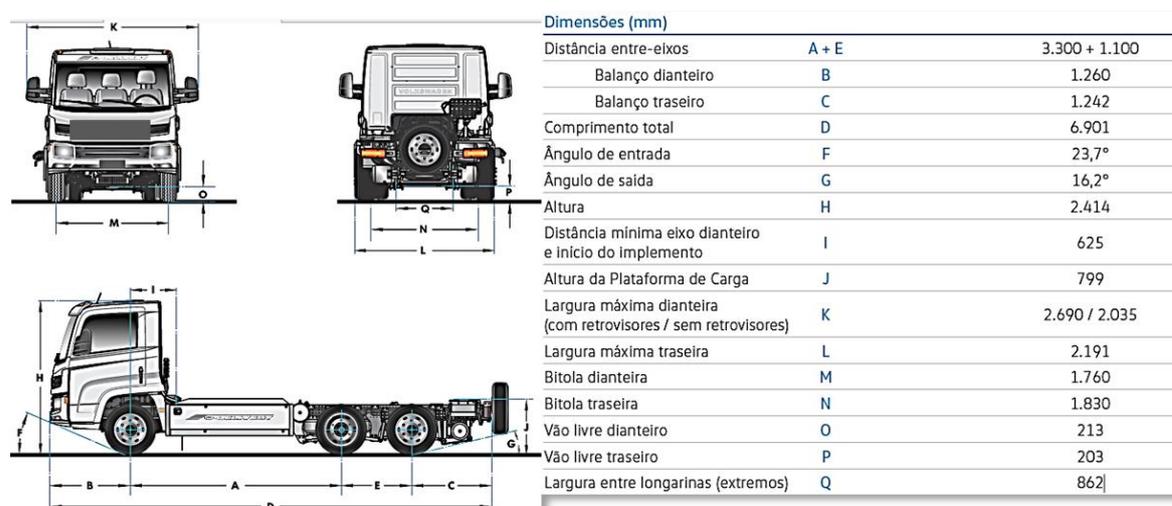
a pandemia da COVID-19, houve a interrupção das observações em alguns períodos. A coleta dos dados foi feita com relação a distância mensal percorrida, distância média diária, consumo médio de óleo diesel por Km rodado e o consumo mensal de óleo diesel no período.

- ❑ **Caso B** – Segundo a empresa fabricante do caminhão elétrico (VUC-e), este é o primeiro caminhão em operação no Brasil na categoria de 14t PBTC (peso bruto total combinado), concebido na configuração 6x2, com 1 eixo simples, com rodagem simples na dianteira e eixo duplo na traseira. A tara do caminhão é de 4.250 kg, com capacidade de carga de 9.750 kg

O motor elétrico apresenta 260kW de potência, com autonomia prevista de até 200 km, sujeito as características de operação. A recarga das baterias pode ser realizada de forma flexível (30% em 15 minutos ou 100% em 3 horas), de forma a atender variadas demandas da operação, assim como a disponibilidade de infraestrutura.

Para uma eficiência maior da utilização do VUC-e, um sistema dinâmico de regeneração da carga da bateria é capaz de recuperar até 35% da energia durante a frenagem. Este sistema age em combinação com o freio de serviço, de maneira a prover máxima desaceleração do veículo e menor desgaste dos componentes, o que reduz o custo de manutenção e aumenta a autonomia do veículo na operação. A Figura 6 mostra de forma ilustrativa o VUC-e.

Figura 6: VUC-e



Fonte: Adaptado de 4rodas (2019)

Finalizando, é importante destacar que, por razões de confidencialidade das informações utilizadas na pesquisa, as identidades das empresas selecionadas serão mantidas em sigilo. No entanto, se necessário e para possibilitar a confirmação das pesquisas feitas, a identificação das empresas e dos respectivos entrevistados será dada a conhecer à banca examinadora, que terá a liberdade de fazer as verificações que forem julgadas necessárias.

3.3. O PROTOCOLO DE PESQUISA

Para guiar a entrevista e assegurar que um mesmo conteúdo fosse abordado em todas elas, um *aide-memoire* foi preparado contendo as perguntas chave e questões relevantes a serem consideradas (BRYMAN, 2016). Neste aspecto, o foco se deu nos principais pontos:

- a) dados de consumo de óleo diesel para o VUC-c,
- b) consumo de energia elétrica para o carregamento das baterias do VUC-e,
- c) a distância percorrida por ambos os veículos, que operam basicamente no mesmo roteiro de entregas e
- d) os custos mensais de manutenção de ambos os veículos.

Com isso, um conjunto específico de perguntas foi preparado para cada um desses pontos, em que essas questões serviram apenas para se iniciar as discussões sobre determinado tema, já que o pesquisador conduziu as entrevistas nas direções consideradas mais relevantes para obter o detalhamento das informações julgadas necessárias.

Ainda, foram realizadas entrevistas aprofundadas com figuras que estavam diretamente envolvidos com as operações de transporte e avaliação dos índices de eficiência da distribuição física dos veículos da frota, com o objetivo de explorar os possíveis benefícios do VEs na logística urbana. Aspectos estratégicos relacionados à tecnologia do VEs foram discutidos com um dos engenheiros de projeto da empresa fabricante. As respostas dos entrevistados foram anotadas pelo pesquisador e depois transcritas para comparação e análise. As informações gerais sobre as entrevistas vão a seguir.

- ❑ Em ambos os casos, as entrevistas foram feitas com o analista responsável pela gestão das entregas das cargas fracionadas feitas com o VEs e com seus homólogos movidos a óleo diesel, bem como outros veículos de características diferentes dos casos selecionados. As entrevistas foram feitas em diferentes datas ao longo do ano de 2019 e 2020 à medida que informações eram necessárias para complementar esta pesquisa. Cabe destacar que na primeira entrevista, foram apresentadas as instalações do centro de distribuição, bem como o VEs, parte da frota em operação, bem como as zonas de entrega que os veículos percorriam durante a operação
- ❑ Também um dos engenheiros responsáveis pelo acompanhamento dos indicadores de eficiência foi entrevistado em um evento específico da área de transportes, momento em que o VEs foi novamente mostrado e apresentado ao público geral com o objetivo de aumentar sua notoriedade no mercado Brasileiros de caminhões.

Por fim, foram coletados dados, por meio do acompanhamento diário *in loco*, em que foram obtidos dados do tempo de carregamento da bateria, distância mensal percorrida, distância média diária percorrida, consumo médio de energia elétrica (EE) (KWh/Km) e consumo mensal de EE para o carregamento das baterias, por um período de quinze (15) meses.

3.4. PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE DOS DADOS

Para fins de cálculos da emissão de GEE, foram considerados os dados da CETESB (2020), em que 1L de óleo diesel, emite 2,6 Kg de CO₂. Além disso, foi considerado o fato de que no Brasil é acrescentado ao óleo diesel comum uma proporção de biodiesel.

Segundo MCTI (2019), a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), determinou que o percentual mínimo de biodiesel a ser acrescido ao óleo diesel comercializado no país no ano de 2019/2020 foi de 10%; ou seja, um litro de óleo diesel utilizado nos veículos de transporte de carga possui 90% de óleo diesel provindos de combustíveis fósseis e 10% de biodiesel.

Com isso, segundo Rathmann *et al.* (2012), ao usar uma mistura de 20% de biodiesel, é possível ter uma redução proporcional de 15% nas emissões de CO₂ em comparação com o diesel puro; e no nível de 5% de adição do biocombustível ao combustível fóssil comum, a redução é de 3,9% nas emissões de CO₂. Portanto, com esta proporção, para cálculo das emissões de CO₂ nesta pesquisa foi considerada a emissão de 2,34 Kg.CO₂ por litro de diesel (CETESB, 2020).

Assim, para o cálculo das emissões de CO₂, do VUC-c foi considerada a somatória do consumo de óleo diesel no período e multiplicado pelo fator de emissão 2,34, conforme a equação 1;

$$\sum \text{consumo de óleo diesel no mês} \times 2,34 \text{ Kg. CO}_2 \text{ por litro de diesel} \quad (1)$$

Além disso, também foi feita a avaliação das emissões de outros gases que são lançados na atmosfera durante a queima do óleo diesel, como o CO, HC, NO_x, MP, SO₂, NO₂, (XING, 2016; CETESB, 2020).

Para este cálculo, foram adotados os fatores de emissões da fase P7 do PROCONVE, recomendados pelo IBAMA (2018) e adaptados por CETESB (2020), com base nas recomendações do “*Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Inventories – Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*”, aonde as emissões de gases do efeito estufa de fontes móveis são melhor calculadas pela quantidade de combustível queimado, pelo seu teor carbônico e pelas emissões correspondentes de CO₂-eq (IPCC, 2006).

Segundo IPCC (2006), há dois métodos que podem ser utilizados para o cálculo do inventário dos GEE, sendo o método *bottom-up* obtido pela quilometragem anual e pelo consumo teórico de combustível, em litros por quilômetro ou a partir dos fatores de emissão (equação 2), e o método *top-down* que prevê a conversão de todas as medidas de consumo de combustível para uma unidade comum (ALVARES JR; LINKE, 2002).

$$Emiss_j = FE_{iabc} \times Atividade_{abc} \quad (2)$$

onde,

- $Emiss_i$ = emissões de um gás i ;
- FE_i = fator de emissão do gás i ;
- Atividade = quantidade de energia consumida ou distância percorrida;
- i = CO₂, CO, NO_x, CH₄, MP, N₂O;
- a = tipo de combustível;
- b = tipo de veículo;
- c = tecnologias de controle de emissões.

Neste sentido, para cálculo das emissões mediadas em CO_{2-eq} dos outros gases resultantes da queima do óleo diesel, foram empregados os dados de CETESB (2020), para caminhões médios, conforme apresentado na tabela 6, tendo em vista o consumo médio de óleo diesel (L/Km), do VUC-c.

Tabela 6: Fatores de emissões de gases na fase PROCONVE P7

Ano	Fase Proconve	Categoria	CO (g CO ₂ Eq/kWh)	HC (g CO ₂ Eq/kWh)	NOx (g CO ₂ Eq/kWh)	MP (g CO ₂ Eq/kWh)	CO ₂ (g CO ₂ Eq/kWh)	NH ₃ (ppm)	
2019	P7	Caminhões	Semileves	0,036	0,006	1,247	0,004	703	9,6
			Leves	0,409	0,010	1,484	0,013	732	10,8
			Médios	0,309	0,014	1,261	0,013	699	9,2
			Semipesados	0,112	0,020	1,550	0,014	704	4,8
			Fatores utilizados para cálculo das emissões em CO _{2-eq}	Pesados	0,165	0,011	1,294	0,011	644

Fonte: Adaptado de CETESB (2020)

Cabe destacar que os fatores de emissões destes gases, são apresentados pela CETESB (2020) em g/Kwh, assim para estimar as emissões provocadas pelo VUC-c, em CO_{2-eq} no período observado, foi preciso converter a quantidade de óleo diesel consumida em kg para quantidade de energia gerada em MJ e posteriormente converter a energia em KW/h.

A conversão de Kg de diesel consumido para KW/h facilita a comparação com as emissões destes gases na produção de energia elétrica, e neste sentido foi considerado que 1 litro de óleo diesel gera cerca de 36MJ e que 1 MJ gera 0,28 KW/h de energia, sendo este dado base de cálculo para as emissões de CO_{2-eq} dos gases CO, HC, NO_x, MP.

Já para o cálculo das emissões de SO₂, se empregou os dados da fase PROCONVE P-7, em que o teor de enxofre máximo permitido para o óleo diesel S-10 seria de 10 mg/kg (ANP, 2013; CETESB, 2020).

Quanto aos fatores de emissão na geração de energia elétrica, utilizada para a recarga das baterias, destaca-se que a Empresa de Planejamento Energético

(EPE) por meio do balanço energético nacional (BEN), produz relatórios com as emissões de CO₂ na geração de energia elétrica, e afirma que variações de emissões de CO₂, podem ocorrer com a proporção de utilização das termelétricas (BEN, 2020).

A tabela 7 apresenta as emissões de Kg.CO₂/MWh, correspondente a energia elétrica gerada e distribuída pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), no período de 2014 a 2020.

Tabela 7: Série histórica de emissões de CO₂ na geração de EE no Brasil

ANO	Kg/MWh
2020	90
2019	88
2017	104,4
2016	101,3
2015	156,6
2014	160,4

Fonte: Adaptado de BEN (2020)

Assim, para o cálculo das emissões de CO₂ na geração de energia elétrica consumida pelo VUC-e, adotou-se a equação 3, em que o valor de 0,09 representa a emissão de Kg.CO₂/KWh gerada no ano de 2020 no Brasil.

$$\sum \text{Consumo mensal de energia elétrica do VUCe} * 0,09 \text{ Kg. CO}_2/\text{KWh} \quad (3)$$

Cabe ressaltar que, nesta pesquisa não foram considerados os custos relacionados à aquisição dos veículos, como também os custos de manutenção, principalmente porque um dos veículos objetos do estudo, o VUC-e, ainda está em fase experimental, e estes dados ainda estão em sigilo por parte dos parceiros do projeto.

4. DISCUSSÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo, serão apresentados os resultados preliminares obtidos por meio da coleta dos dados de consumo de óleo diesel empregado no VUC-c, consumo de energia elétrica para o carregamento das baterias do VUC-e e distância percorrida pelos veículos objetos de estudo.

4.1. AVALIAÇÃO DO VUC-c

Conforme apresentado no capítulo metodologia, em se tratando do VUC-c, para avaliação comparativa, a coleta dos dados foi feita com relação a: distância mensal percorrida, distância média diária, consumo médio de óleo diesel por Km rodado e o consumo mensal de óleo diesel no período.

Com isso, a tabela 8 apresenta, os dados de deslocamento, a quilometragem percorrida em cada mês, a quilometragem média diária para cada mês, assim como o consumo mensal de óleo diesel, e o consumo médio de óleo diesel por quilometragem rodada (km/L), também a correspondente emissão de Kg.CO₂ acumulada em cada mês, obtido por meio da equação 1,

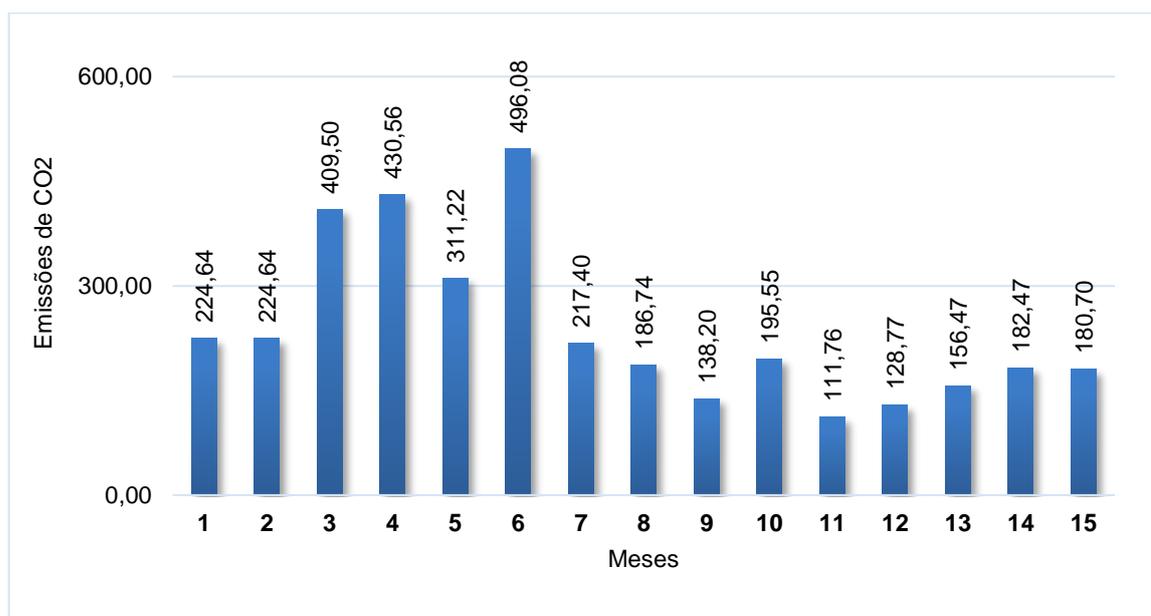
Tabela 8: Dados do deslocamento do VUC-c na RMSP

Mês	Distância percorrida (Km)	Distância média diária (Km)	Consumo médio de diesel (Km/L)	Consumo mensal de diesel (L)	Emissão mensal de CO ₂ (Kg)
1	288	35	3,0	96	224,64
2	280	40	2,9	96	224,64
3	473	43	2,7	175	409,50
4	611	47	3,3	184	430,56
5	387	43	2,9	133	311,22
6	720	45	3,4	212	496,08
7	303	43	3,3	93	217,40
8	311	44	3,9	80	186,74
9	183	26	3,1	59	138,20
10	283	40	3,4	84	195,55
11	222	32	4,6	48	111,76
12	225	32	4,1	55	128,77
13	260	37	3,9	67	156,47
14	270	39	3,5	78	182,47
15	290	41	3,8	77	180,70
TOTAL	5.107			1536	3.594,70

Fonte: Elaboração própria

O gráfico 3 mostra o comportamento da emissão mensal de CO₂ pelo VUC-c, ao longo dos 15 meses de observações, correspondente ao transporte de cargas na RMSP, de modo que no período foram lançadas na atmosfera por este veículo 3.594,70 Kg.CO₂.

Gráfico 3: Emissões de CO₂ por kg de óleo diesel



Fonte: Elaboração própria

Ainda, com base nas recomendações do IPCC (2006), aonde as emissões de GEE apresentam melhores aspectos quando calculadas pela quantidade de combustível queimado, pelo seu teor carbônico e pelas emissões correspondentes de CO₂-eq e utilizando o método *bottom-up*, conforme equação 2, as emissões dos gases CO, HC, NO_x, MP, SO₂ são apresentadas em CO₂-eq na tabela 9.

Tabela 9: Emissões de CO, HC, NOX, MP e SO₂ do VUC-c em CO₂-eq

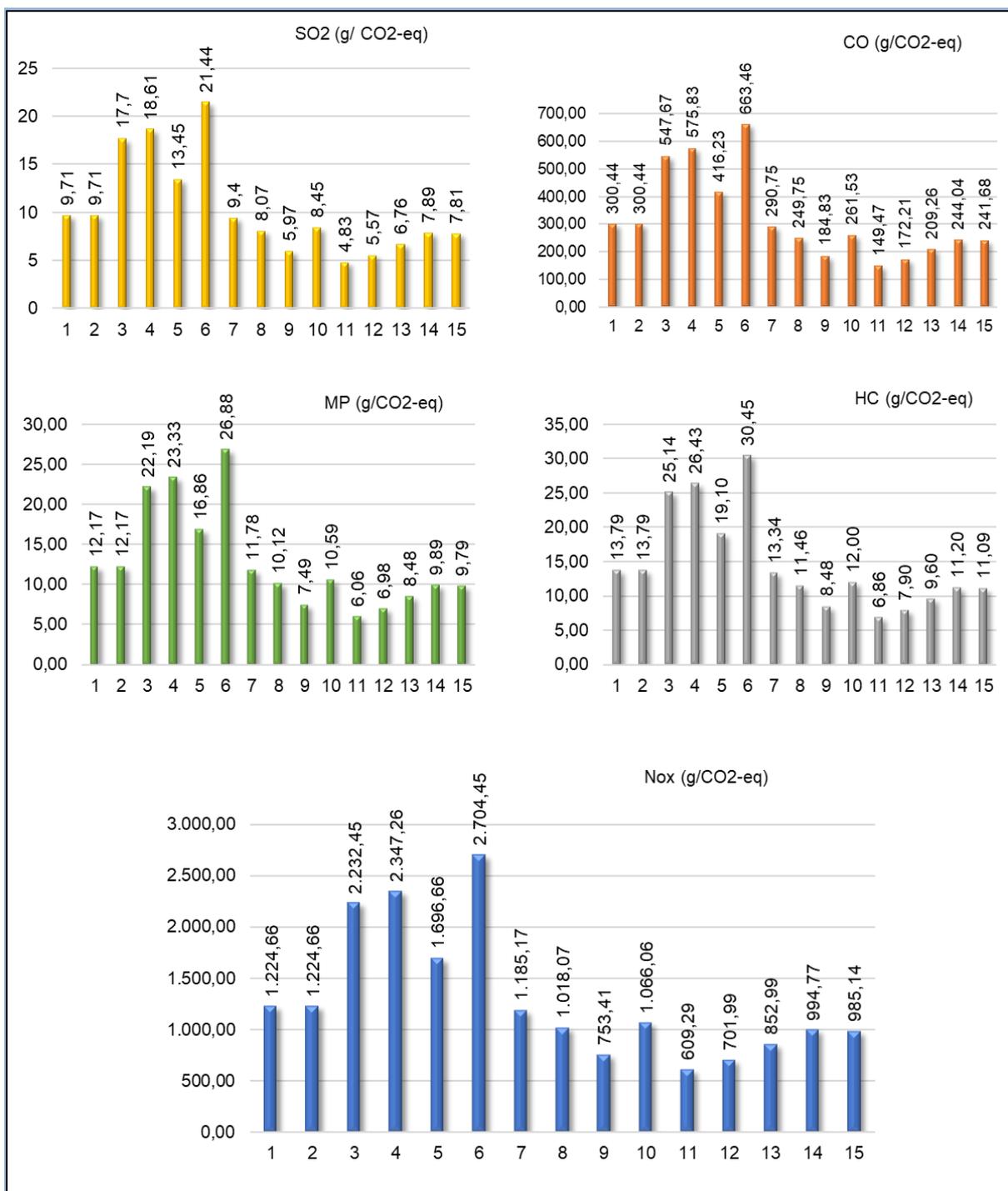
	CO	HC	NOx	MP	SO ₂
Fator de emissão					
Fase P7	0,309438	0,014202	1,261356	0,012536	0,01
PROCONVE					
Mês	CO (g/CO ₂ -eq)	HC (g/CO ₂ -eq)	NOx (g/CO ₂ -eq)	MP (g/CO ₂ -eq)	SO ₂ (g/CO ₂ -eq)
1	300,44	13,79	1.224,66	12,17	9,71
2	300,44	13,79	1.224,66	12,17	9,71
3	547,67	25,14	2.232,45	22,19	17,70
4	575,83	26,43	2.347,26	23,33	18,61
5	416,23	19,10	1.696,66	16,86	13,45
6	663,46	30,45	2.704,45	26,88	21,44
7	290,75	13,34	1.185,17	11,78	9,40
8	249,75	11,46	1.018,07	10,12	8,07
9	184,83	8,48	753,41	7,49	5,97
10	261,53	12,00	1.066,06	10,59	8,45
11	149,47	6,86	609,29	6,06	4,83
12	172,21	7,90	701,99	6,98	5,57
13	209,26	9,60	852,99	8,48	6,76
14	244,04	11,20	994,77	9,89	7,89
15	241,68	11,09	985,14	9,79	7,81
TOTAL	4.807,57	220,65	19.597,02	194,76	155,36

Fonte: Elaboração própria

Destaca-se que, para estimar as emissões provocadas pelo VUC-c, em CO₂-eq no período observado, foi preciso converter a quantidade de óleo diesel consumida em kg para quantidade de energia gerada em MJ e posteriormente converter a energia em KW.h, e neste sentido, foi considerado que 1 litro de óleo diesel gera cerca de 36,12MJ e que 1 MJ gera 0,28 KW/h de energia, sendo este dado base de cálculo para as emissões de CO₂-eq dos gases CO, HC, NOx, MP emitidos na queima do óleo diesel do VUC-c.

Por exemplo no mês 1, o VUC-c consumiu 96 L de óleo diesel que corresponde a 3.468MJ que corresponde 970,91 KW/h, sendo este a medida considerada e multiplicada pelo fator de emissão de cada gás, em que no caso do CO foi de 970,91 x 0,309438, resultando em 300,44 g/CO₂-eq.

Feitas estas considerações, é possível observar que durante o período, o NO_x aparece como elemento com maior emissão (19.597,02 g/CO₂-eq), seguido do CO (4.807,57 g/CO₂-eq), MP (194,76 g/CO₂-eq), HC (220,65 g/CO₂-eq) e SO₂ (155,36 g/CO₂-eq). Estes dados também podem ser vistos na figura 7.

Figura 7: Evolução das emissões de CO, HC, NOX, MP e SO₂ em CO₂-eq

Fonte: Elaboração própria

Feitas as estimativas de emissões de CO₂, CO, HC, NO_x, MP e SO₂, foi possível estimar as emissões totais de GEE em CO₂eq, em que no período totalizaram 3.619,67 kg/CO₂e, conforme apresentado na tabela 10.

Tabela 10: Emissões Totais de CO₂ no período

	CO	HC	Nox	MP	SO ₂	CO ₂	TOTAL
Emissões no período (Kg)	4,81	0,22	19,60	0,19	0,15	3.594,70	
% das emissões totais	0,070%	0,004%	0,555%	0,004%	0,004%	99,36%	3619,67

Fonte: Elaboração própria

Neste sentido segundo os relatórios do IPCC (2006), Álvares Jr. & Linke (2002), Ribeiro (2001) e CETESB (2020), apontam que o CO₂ é responsável por mais de 97% das emissões totais de GEE, enquanto os demais gases representam em torno de 3%.

Estes dados reforçam as estimas apresentada neste estudo, conforme apresentado na tabela 10, em que as emissões CO₂ representam mais de 99 % das emissões totais dos GEE medidas em CO_{2e-eq}

4.2. AVALIAÇÃO DO VUC-e

Assim como feito para o VUC-c, para avaliação do VUC-e a coleta de dados ocorreu por meio do acompanhamento diário *in loco*, em que foram obtidos dados do tempo de carregamento da bateria, distância mensal percorrida, distância média diária percorrida, consumo médio de EE (KWh/Km) e consumo mensal de EE para o carregamento das baterias

A tabela 11 mostra as respectivas emissões de CO₂ por parte do VUC-e no período observado, considerando a distância percorrida e o consumo médio de KWh/Km.

Para o cálculo das emissões de CO₂ na geração de energia elétrica utilizada para o carregamento das baterias do VUC-e, adotou-se a equação 3, em que o valor de 0,09 representa a emissão de Kg.CO₂/KWh gerada no ano de 2020 no Brasil.

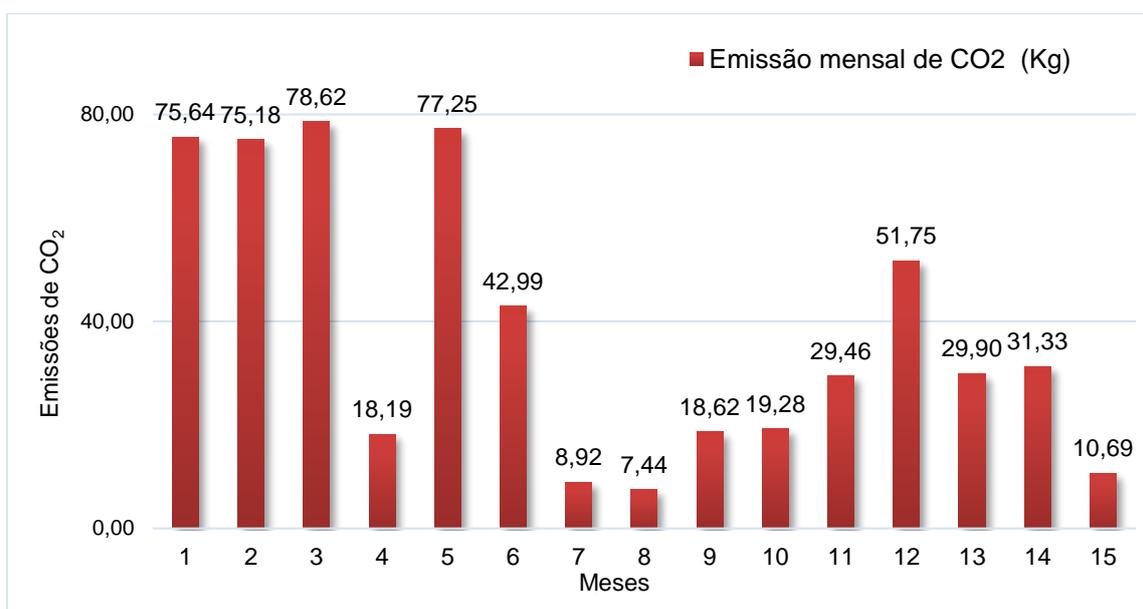
$$\sum \text{Consumo mensal de energia elétrica do VUCe} * 0,09 \text{ Kg. CO}_2/\text{KWh} \quad (3)$$

Tabela 11: Dados do deslocamento do VUC-e na RMSP

Mês	Distância percorrida (Km)	Distância média diária (Km)	Consumo médio de EE (Km/KWh)	Consumo mensal de EE (Kwh)	Emissão mensal de CO ₂ (Kg)
1	663	41	0,789	840,44	75,64
2	420	42	0,503	835,34	75,18
3	420	42	0,743	873,57	78,62
4	104	52	0,77	202,11	18,19
5	658	47	0,767	858,33	77,25
6	364	52	0,762	477,63	42,99
7	120	40	0,826	99,08	8,92
8	104	35	0,795	82,64	7,44
9	258	51	0,802	206,88	18,62
10	332	47	0,645	214,25	19,28
11	323	54	1,013	327,32	29,46
12	642	53	0,896	575,03	51,75
13	447	49	0,743	332,21	29,90
14	395	56	0,881	348,11	31,33
15	110	55	1,080	118,80	10,69
Total	5.360				575,26

Fonte: Elaboração própria

Os dados apontam que durante o período observado, na geração de energia elétrica consumida para o abastecimento do VUC-e foram lançados na atmosfera, a quantidade de 575,26 kg.CO₂, conforme mostra o gráfico 4.

Gráfico 4: Emissões de CO₂ na geração de E.E. consumida pelo VUC-e.

Fonte: Elaboração própria

Assim como na avaliação do VUC-c, também foi feita a avaliação dos outros gases que são emitidos na atmosfera durante a geração de energia elétrica em CO₂-eq sendo considerados os gases CO, NO_x, MP e o SO₂.

Para este cálculo, foram considerados os fatores de emissões destes gases na geração de energia elétrica no Brasil pelo SIN, conforme apresentado nos trabalhos de Henriques *et al.* (2019), Wu e Zhang (2017) e pelo SEEG (2020).

Cabe destacar que as emissões destes gases no Brasil, varia de acordo com a utilização das termelétricas, assim os fatores de emissões utilizados para os cálculos são os disponíveis em Henriques *et al.* (2019), por considerar a média nacional e comparar as emissões do Brasil com a de países como China, França e USA, além de fazer previsões destas emissões para o período de 2019-2027.

A tabela 12 mostra as emissões provocadas na geração de energia elétrica utilizada na recarga das baterias do VUC-e, bem como o consumo mensal de EE durante cada mês.

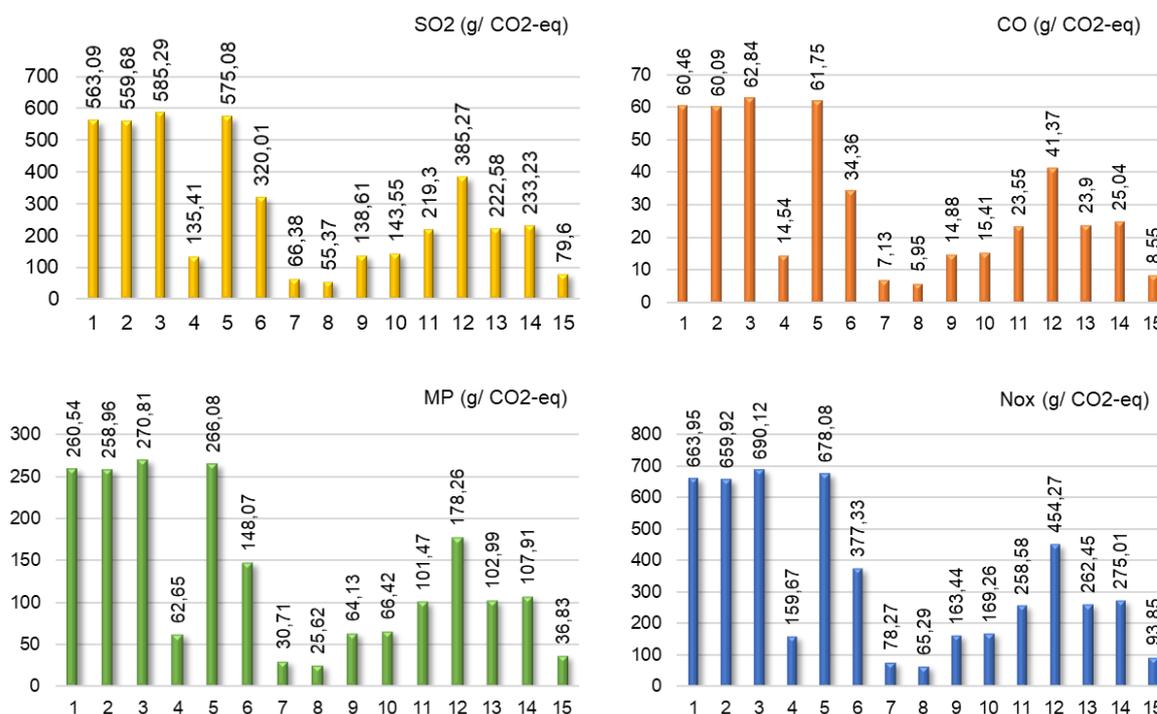
Tabela 12: Emissões de CO, MP, NO_x e SO₂ em CO₂-eq pelo VUC-e

Gases inventariados		CO	MP	NO_x	SO₂
	Fator de emissão	0,072	0,31	0,79	0,67
Mês	Consumo mensal de EE KW/h	CO (g/ CO₂-eq)	MP (g/ CO₂-eq)	Nox (g/ CO₂-eq)	SO₂ (g/ CO₂-eq)
1	840,44	60,46	260,54	663,95	563,09
2	835,34	60,09	258,96	659,92	559,68
3	873,57	62,84	270,81	690,12	585,29
4	202,11	14,54	62,65	159,67	135,41
5	858,33	61,75	266,08	678,08	575,08
6	477,63	34,36	148,07	377,33	320,01
7	99,08	7,13	30,71	78,27	66,38
8	82,64	5,95	25,62	65,29	55,37
9	206,88	14,88	64,13	163,44	138,61
10	214,25	15,41	66,42	169,26	143,55
11	327,32	23,55	101,47	258,58	219,30
12	575,03	41,37	178,26	454,27	385,27
13	332,21	23,90	102,99	262,45	222,58
14	348,11	25,04	107,91	275,01	233,23
15	118,80	8,55	36,83	93,85	79,60
TOTAL	6.391,74	459,82	1.981,44	5.049,47	4.282,47

Fonte: Elaboração própria

Com isso, é possível observar que o NO_x aparece como elemento com maior emissão comparado aos demais (5.049,47 g/CO₂-eq), seguido do SO₂ (4.282,47 g/CO₂-eq), MP (1.981,44 g/CO₂-eq) e CO (459,82 g/CO₂-eq). Estas informações também são apresentadas na figura 8.

Figura 8: Emissões de CO, MP, NO_x e SO₂ em CO₂-eq pelo VUC-e



Fonte: Elaboração própria (2021)

Feitas as estimativas de emissões de CO, HC, NO_x, MP e SO₂, foi possível estimar as emissões totais de GEE medidos em CO₂-eq, na geração de EE utilizadas para o carregamento das baterias do VUC-e, conforme apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Emissões totais de GEE do VUC-e

	CO	MP	NO _x	SO ₂	CO ₂	TOTAL
Emissões no período (Kg)	0,45982	1,98144	5,04947	4,28247	575,26	587,0332
% das emissões totais	0,0783%	0,3375%	0,8602%	0,7295%	97,9945%	

Fonte: Elaboração própria

Assim como nas estimativas totais das emissões de GEE do VUC-c, estes resultados vão de encontro com as informações de Álvares Jr. & Linke (2000),

Ribeiro (2001) e CETESB (2019), onde apontam que o CO₂ é responsável por mais de 97% das emissões totais de GEE, enquanto os demais gases representam em torno de 3%.

4.3. AVALIAÇÃO COMPARATIVA ENTRE VUC-C E O VUC-E

Neste tópico serão apresentadas as avaliações comparativas das distâncias percorrida pelos veículos no período observado, das emissões de CO₂, dos custos do consumo de diesel e de energia elétrica, bem como das emissões de CO, NO_x, MP e SO₂ de ambos os veículos em CO₂-eq.

A tabela 14 mostra os dados comparativos com relação as distâncias percorridas pelos dois tipos de veículos, em cada mês, assim como as médias diárias, durante o sistema de distribuição de cargas fracionadas (bebidas), na RMSP.

Tabela 14: Dados do deslocamento dos veículos: VUC-c e VUC-c na RMSP

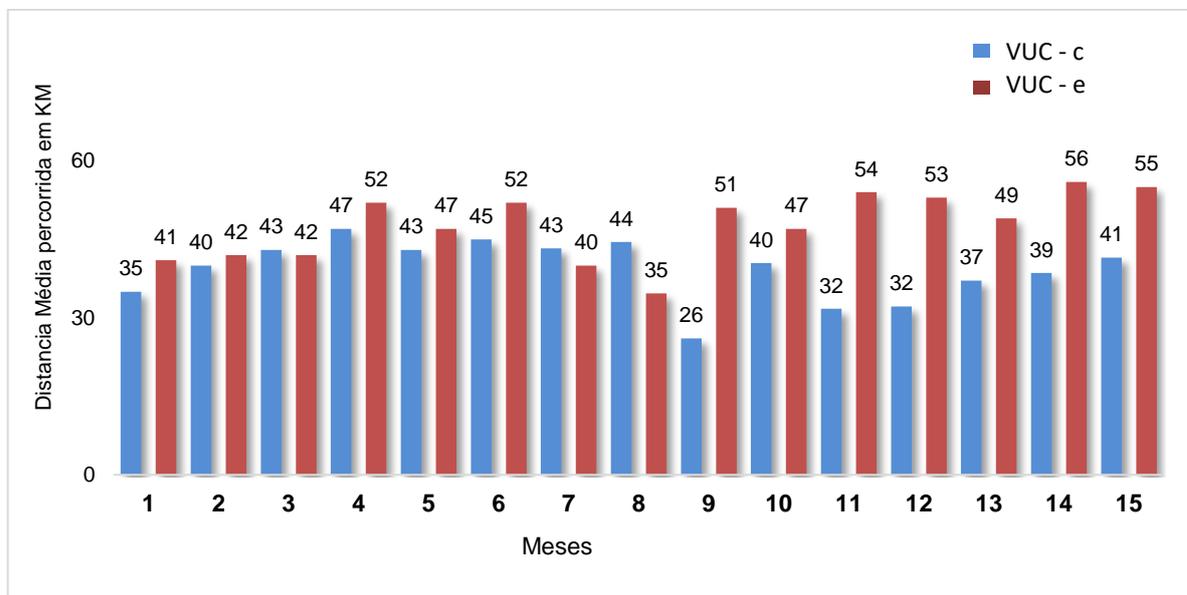
Mês	VUC-c	VUC-c	VUC-e	VUC-e
	Km (mensal)	Km (média diária)	Km (mensal)	Km (média diária)
1	288	35	663	41
2	280	40	420	42
3	473	43	420	42
4	611	47	104	52
5	387	43	658	47
6	720	45	364	52
7	303	43	120	40
8	311	44	104	35
9	183	26	258	51
10	283	40	332	47
11	222	32	323	54
12	225	32	642	53
13	260	37	447	49
14	270	39	395	56
15	290	41	110	55
TOTAL	5107		5360	

Fonte: Elaboração própria

Os dados comparativos entre as médias diárias do deslocamento dos veículos VUC-c e VUC-e, referente aos meses de julho a dezembro de 2019 e fevereiro a novembro de 2020, também são apresentados no gráfico 5, em que se observa ligeira

diferença entre ambos os deslocamentos, relativos aos roteiros de entregas das cargas fracionadas.

Gráfico 5: Comparativo deslocamento diário médio - VUC-c x VUC-e



Fonte: Elaboração própria

Outra comparação feita diz respeito aos custos com consumo de energia, e custo com consumo de óleo diesel, conforme apresentados na tabela 15. Neste tópico, foram utilizados como base os dados médios praticados na venda do óleo diesel na cidade de São Paulo que foi de R\$ 3,69/L_{diesel} (ANP, 2020) e o valor médio da energia elétrica industrial que foi de R\$ 0,51/KWh (MME, 2020).

Tabela 15: Custos envolvidos nos deslocamentos dos veículos VUC-c e VUC-e

Mês	Distância percorrido VUC-c (Km)	Consumo mensal de diesel (L)	Custo VUC-c (R\$)	Distância percorrido VUC-e (Km)	Consumo mensal de EE (KWh)	Custo VUC-e (R\$)
1	288	96	354,24	663	840,44	428,6244
2	280	96	354,24	420	835,34	426,0234
3	473	175	645,75	420	873,57	445,5207
4	611	184	678,96	104	202,11	103,0761
5	387	133	490,77	658	858,33	437,7483
6	720	212	782,28	364	477,63	243,5913
7	303	93	343,17	120	99,08	50,5308
8	311	80	295,2	104	82,64	42,1464
9	183	59	217,71	258	206,88	105,5088
10	283	84	309,96	332	214,25	109,2675
11	222	48	177,12	323	327,32	166,9332
12	225	55	202,95	642	575,03	293,2653
13	260	67	247,23	447	332,21	169,4271
14	270	78	287,82	395	348,11	177,5361
15	290	77	284,13	110	118,8	60,588
TOTAL	5.106	1.537	R\$ 5.671,53	5.360	6.391,74	R\$ 3.259,79

Fonte: Elaboração própria

Feitas estas comparações, os dados mostram a vantagem do uso do caminhão elétrico (VUC-e), cujos gastos com energia representam cerca de 57,41% dos valores gastos pelo caminhão convencional (VUC-c).

Ainda são apresentadas comparações medidas em CO₂-eq. dos demais gases emitidos na queima do óleo diesel e na geração de energia elétrica (CO, MP, NO_x e SO₂), conforme apresentado na tabela 16 e na tabela 17.

Tabela 16: Emissões de CO, CO₂, NOx, MP e SO₂ pelo VUC-c

Mês	CO (VUC-c) (g/CO ₂ -eq)	MP (VUC-c) (g/CO ₂ -eq)	NOx (VUC-c) (g/CO ₂ -eq)	SO ₂ (VUC-c) (g/CO ₂ -eq)	CO ₂ (VUC-c) (Kg)
1	300,44	12,17	1.224,66	9,71	224,64
2	300,44	12,17	1.224,66	9,71	224,64
3	547,67	22,19	2.232,45	17,70	409,50
4	575,83	23,33	2.347,26	18,61	430,56
5	416,23	16,86	1.696,66	13,45	311,22
6	663,46	26,88	2.704,45	21,44	496,08
7	290,75	11,78	1.185,17	9,40	217,40
8	249,75	10,12	1.018,07	8,07	186,74
9	184,83	7,49	753,41	5,97	138,20
10	261,53	10,59	1.066,06	8,45	195,55
11	149,47	6,06	609,29	4,83	111,76
12	172,21	6,98	701,99	5,57	128,77
13	209,26	8,48	852,99	6,76	156,47
14	244,04	9,89	994,77	7,89	182,47
15	241,68	9,79	985,14	7,81	180,70
TOTAL	4.807,59	194,78	19.597,03	155,36	3595

Fonte: Elaboração própria

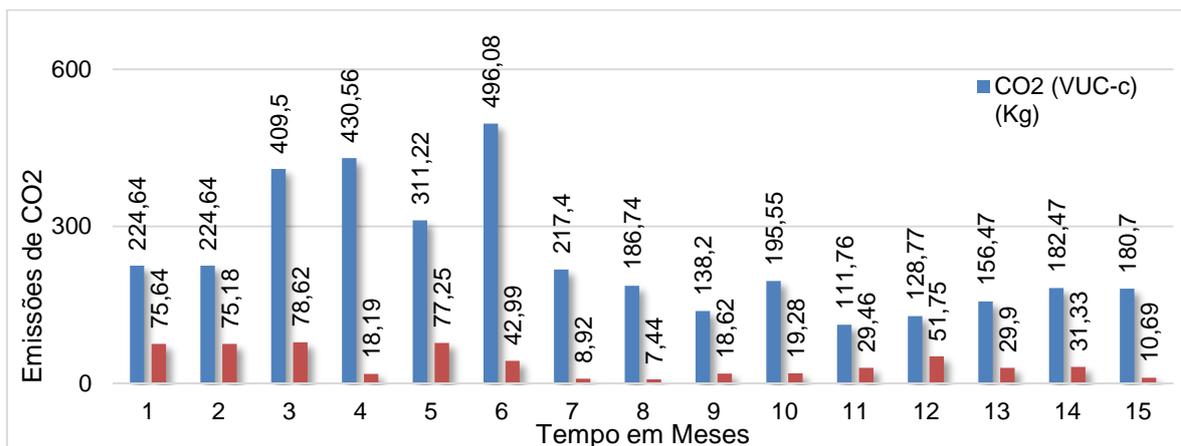
Tabela 17: Emissões de CO, CO₂, NOx, MP e SO₂ pelo VUC-e

Mês	CO (VUC-e) (g/CO ₂ -eq)	MP (VUC-e) (g/CO ₂ -eq)	Nox (VUC-e) (g/CO ₂ -eq)	SO ₂ (VUC-e) (g/CO ₂ -eq)	CO ₂ (VUC-e) (Kg)
1	60,46	260,54	663,95	563,09	75,64
2	60,09	258,96	659,92	559,68	75,18
3	62,84	270,81	690,12	585,29	78,62
4	14,54	62,65	159,67	135,41	18,19
5	61,75	266,08	678,08	575,08	77,25
6	34,36	148,07	377,33	320,01	42,99
7	7,13	30,71	78,27	66,38	8,92
8	5,95	25,62	65,29	55,37	7,44
9	14,88	64,13	163,44	138,61	18,62
10	15,41	66,42	169,26	143,55	19,28
11	23,55	101,47	258,58	219,30	29,46
12	41,37	178,26	454,27	385,27	51,75
13	23,90	102,99	262,45	222,58	29,90
14	25,04	107,91	275,01	233,23	31,33
15	8,55	36,83	93,85	79,60	10,69
TOTAL	459,82	1.981,44	5.049,47	4.282,47	575,26

Fonte: Elaboração própria

A avaliação comparativa das quantidades emitidas de CO₂ de ambos os veículos, é mostrada no gráfico 6, no qual observa que as emissões do VUC-e no período (575,26 kg CO₂), representam em torno de 16% das emissões do VUC-c (3595 kg CO₂), de modo que este indicador é favorável ao uso do VEs no transporte de cargas fracionadas em centros urbanos.

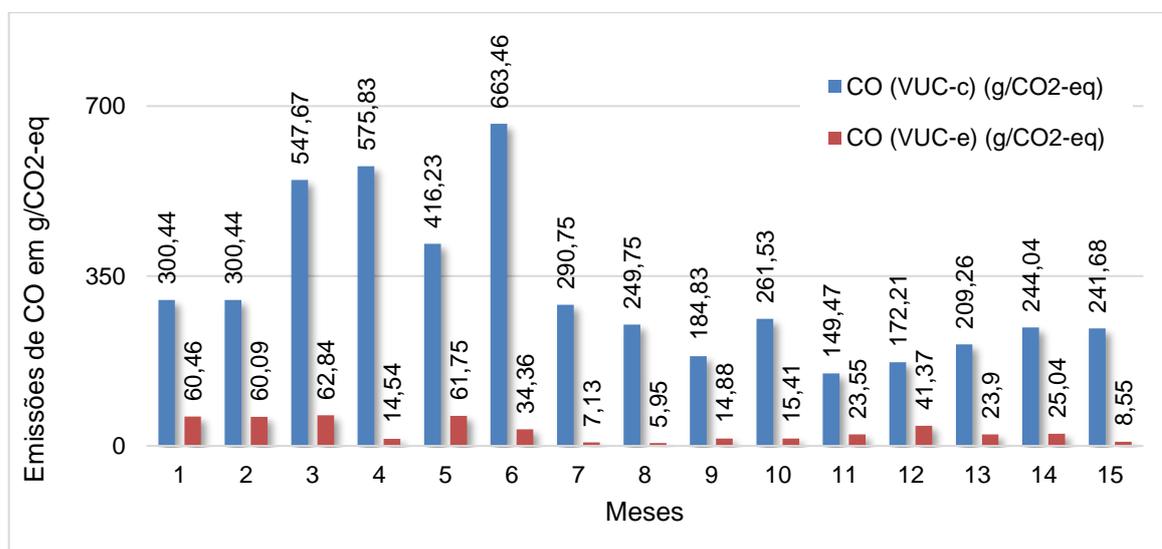
Gráfico 6: Comparativo emissões de CO₂ - VUC-c x VUC-e.



Fonte: Elaboração própria

Já as emissões de CO do VUC-e medidas em g/CO₂-eq, em comparação com o VUC-c, representam cerca de 9,56%, em que as emissões totais deste gás do VUC-e foram de 459,82 g/CO₂-eq e as emissões de CO pelo VUC-c foram de 4.807,57 g/CO₂-eq, conforme apresentado no gráfico 7.

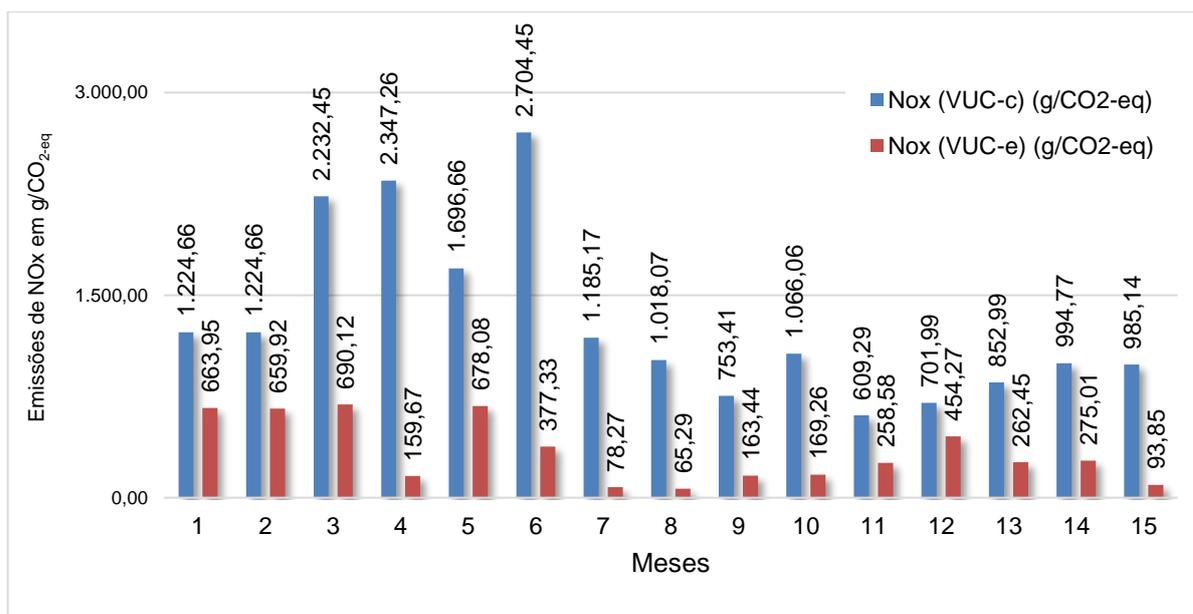
Gráfico 7: Comparativo de emissões de CO em g/CO₂-eq.



Fonte: Elaboração própria

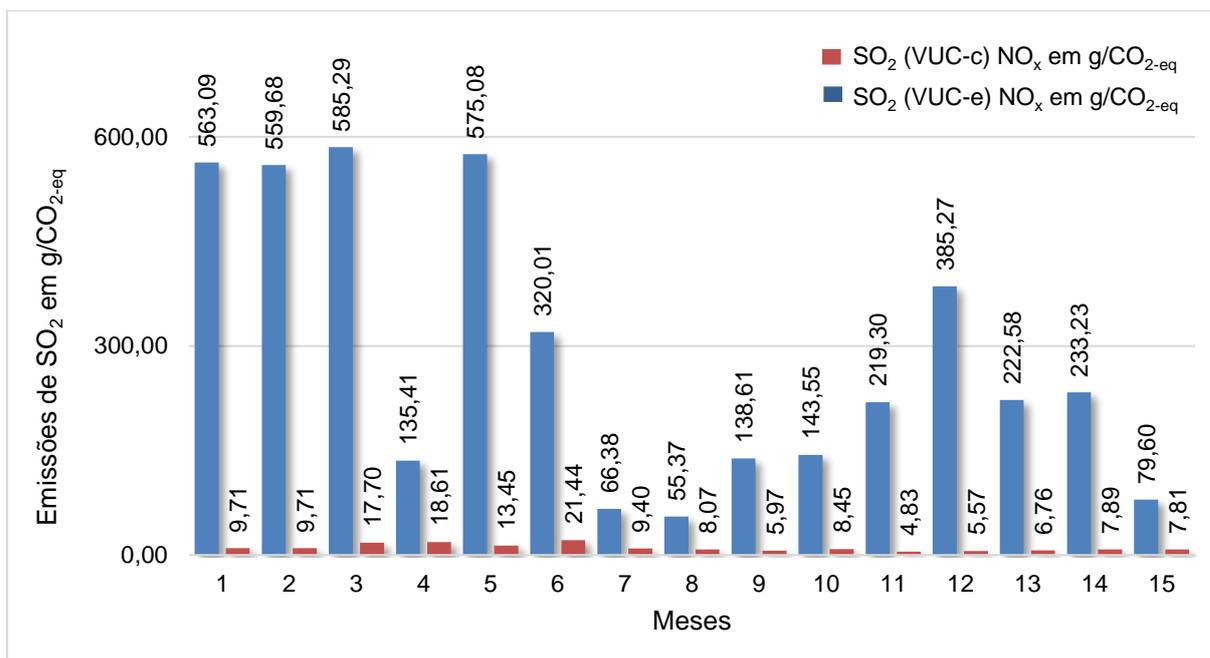
Quanto as emissões de NO_x do VUC-e medidas em g/Kwh, em comparação com o VUC-c, estas representam cerca de 25,77%, em que as emissões do VUC-e foram de 5.049,47 g/CO₂-eq e as emissões de NO_x pelo VUC-c foram de 19.597,02 g/CO₂-eq, conforme apresentado no gráfico 8.

Gráfico 8: Comparativo de emissões de NO_x em g/CO₂-eq



Fonte: Elaboração própria

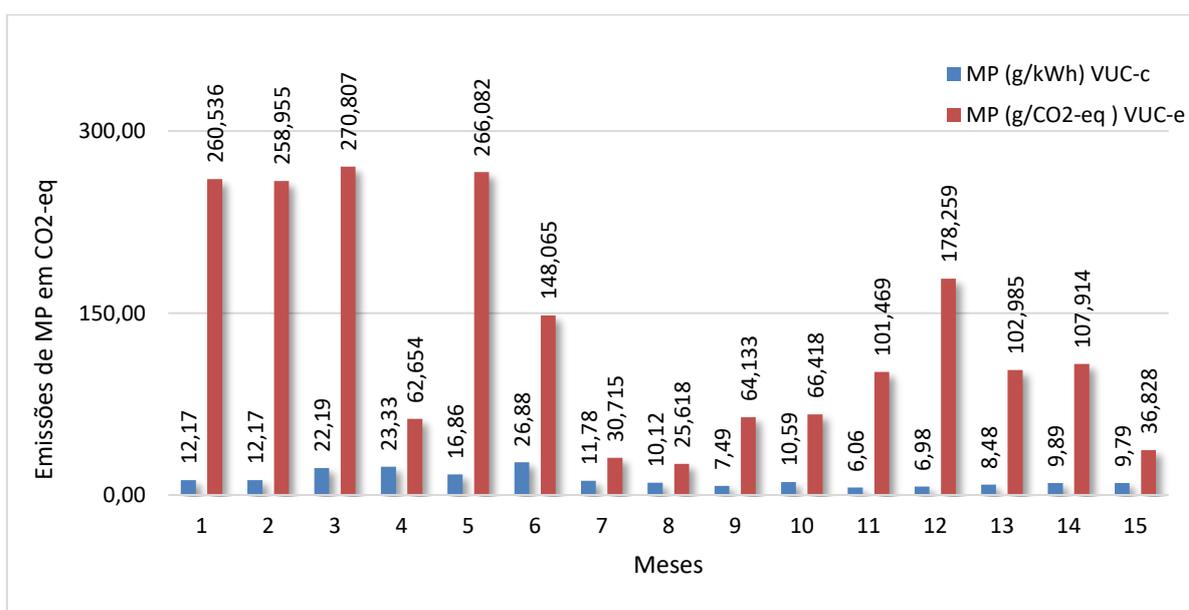
Observa-se que as emissões de SO₂ em g/CO₂-eq, quando considerado os fatores de emissões de todo SIN, apresentam aumento, em um cenário que as emissões de SO₂ pelo VUC-c foram de 155,36 g/CO₂-eq e as emissões de SO₂ na geração de energia para abastecimento do VUC-e foi de 4.282,47 g/CO₂-eq, conforme o gráfico 9.

Gráfico 9: Comparativo de emissões de SO₂ em g/CO₂-eq

Fonte: Elaboração própria

Ainda, foram feitas as medidas das emissões de MP do VUC-e em g/CO₂-eq, em comparadas com o VUC-c, e neste sentido, quando considerados os fatores de emissões de todo SIN, apresentam aumento, em que as emissões do VUC-e foram de 1.981,44 g/Kwh e as emissões pelo VUC-c foram de 194,76 g/Kwh, conforme apresentado no gráfico 10.

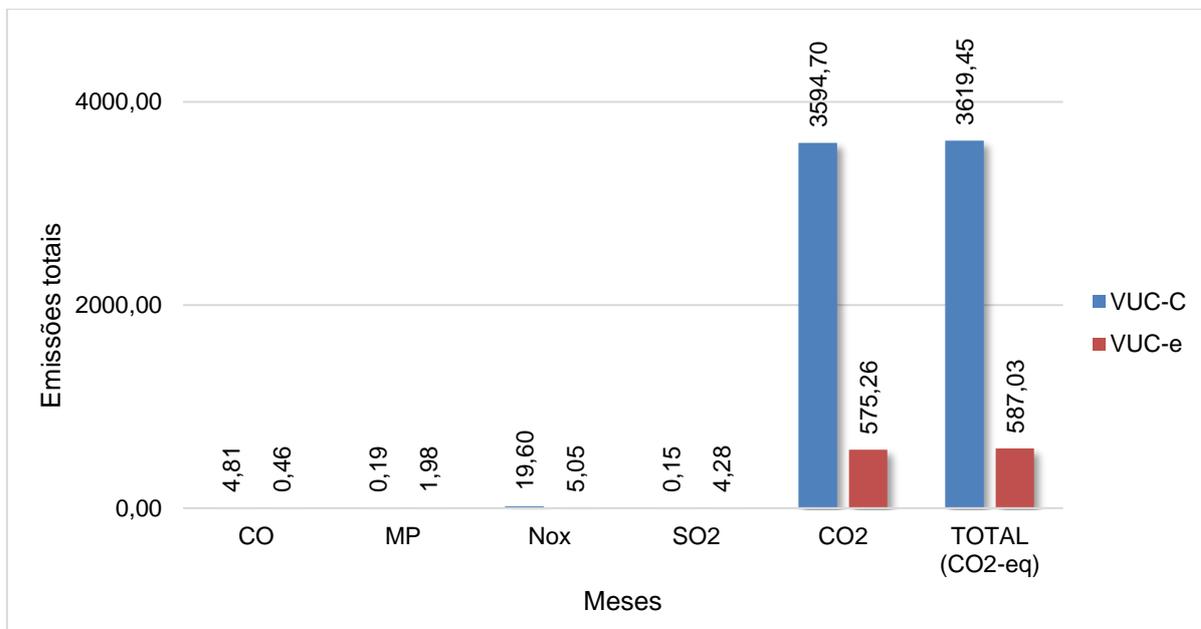
Gráfico 10: Emissões comparativas das emissões de MP.



Fonte: Elaboração própria

Por fim, o gráfico 11 apresenta as comparações das emissões totais em Kg/CO₂-eq, em que se observa vantagem do VUC-e em relação ao seu homologado (VUC-c).

Gráfico 11: Comparativo de emissões totais em CO₂-eq



Fonte: Elaboração própria

Neste sentido observa-se que as emissões totais do VUC-e medidas em CO₂-eq, representam em torno de 16% das emissões totais do VUC-c em CO₂-eq, reforçando os resultados de pesquisas que foram feitas ao redor do mundo.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foi feita a avaliação dos possíveis benefícios do uso de veículos elétricos empregados em sistema de transporte de cargas fracionadas, limitando-se a observação de um VUC-e em fase de testes e em uma operação real de transporte na RMSP.

A revisão bibliométrica e sistemática desta pesquisa, mostrou um aumento das publicações no campo da utilização de VEs em sistemas de transporte de cargas, em periódicos com fatores de impacto significante nos últimos anos, reforçando a importância de alternativas aos atuais sistemas utilizados no transporte de mercadorias.

Além disso, esta pesquisa também identificou um vasto campo que ainda pode ser pesquisado aqui no Brasil, pois não foram identificados estudos nos âmbitos de políticas de incentivo fiscal ao uso de VEs, viabilidade econômica da utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas fracionadas, redução das emissões de GEE nestes sistemas, bem como impactos sociais, ambientais e econômicos em sistema de transporte de mercadorias que utilizam veículos elétricos.

Para a teoria, os resultados alcançados reforçam as afirmativas de que em ambientes com características de trânsito *stop and go*, os veículos de carga movidos a eletricidade mostraram ser mais vantajosos do que os convencionais movidos a óleo diesel. Neste sentido a presente pesquisa, indica que o veículo elétrico, proporcionou redução nas emissões de GEE e de outros gases, bem como redução nos custos de energia se comparados ao veículo movido a óleo Diesel.

Com relação ao meio ambiente, considerando as emissões de GEE resultantes da geração de energia elétrica, o veículo elétrico apresentou ótimo desempenho, reduzindo as emissões de CO₂ em 84%, as de CO em aproximadamente 91% e o NO_x em torno de 75% no período observado, se comparado ao veículo movido a óleo diesel.

Entretanto, as emissões de SO₂ e as emissões de MP, quando comparadas as emissões resultantes da queima do óleo diesel e as emissões na geração de EE pelo SIN, mostram um aumento considerável.

No que diz respeito a esfera social destaca-se também a redução das emissões de ruídos, em função das características do motor movido a eletricidade, assim como o conforto proporcionado ao motorista ao dirigir durante a operação.

A avaliação com relação aos aspectos econômicos dos gastos com óleo diesel e com os gastos da eletricidade utilizada para o carregamento das baterias do VUC-e, mostra uma economia de aproximadamente 43% quando comparado ao VUC-c.

Os dados de redução de emissões de GEE e economia de energia mostraram-se satisfatórios, entretanto o CTP não foi levado em conta neste primeiro momento da pesquisa devido alguns dados para esta variável, como por exemplo o custo de manutenção do VE, correrem em sigilo empresarial, sendo este ponto considerado uma limitação deste trabalho.

Outro aspecto considerado na pesquisa é que os objetivos foram atingidos ao realizar uma avaliação comparativa, entre veículos urbanos convencionais de cargas movidos a óleo diesel, e os VEs, com relação aos benefícios ambientais e econômicos.

Por fim, como trabalhos futuros para esta pesquisa, sugere-se a apuração do CTP bem como conhecer quais os desafios e oportunidades da utilização de veículos elétricos em sistemas de transporte de cargas no Brasil, e a quais políticas fiscais poderiam incentivar o uso destes veículos com o objetivo de torná-los mais atrativos para as empresas de transporte de cargas.

REFERENCIAS

ACEA, European Automobile Manufacturers Association, New Commercial Vehicle registrations, European Union, December 2019. Disponível em: <https://www.acea.be/press-releases/article/commercial-vehicle-registrations-2.5-full-year-2019-5.7-in-december>. Acesso 03 de set de 2021.

AHANI, Parisa; ARANTES, Amilcar; MELO, Sandra. A portfolio approach for optimal fleet replacement toward sustainable urban freight transportation. **Transportation Research, D**, v.48, p.357-368, 2016.

AL-DAL'AIN, R.; CELEBI, D. Planning a mixed fleet of electric and conventional vehicles for urban freight with routing and replacement considerations. **Sustainable Cities and Society**, v.73, 103105, 2021.

ALIMUJIANG, Adila; JIANG, Ping. Synergy and co-benefits of reducing CO2 and air pollutant emissions by promoting electric vehicles—A case of Shanghai. **Energy for Sustainable Development. V.55**, p.181-189, 2020.

ALTOÉ, Leandra; COSTA, José Marcio; FILHO, Delly Oliveira, MARTINEZ, Francisco Javier Rey, FERRAREZ, Adriano Henrique, VIANA, Lucas de Arruda (2017). Políticas públicas de incentivo à eficiência energética. **Dilemas Ambientais e Fronteiras do Conhecimento II. Estudos avançados**, v.31, n.89, p.285-297, 2017.

ALVARES JR., Olimpio de Melo; LINKE, Renato Ricardo Antônio – Metodologia Simplificada de Cálculo das Emissões de Gases do Efeito Estufa de Frotas de Veículos no Brasil – **CETESB**. São Paulo, 2002. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/gases_efeito_estufa.pdf. Acesso em: 25/08/2021.

ANP. Agência nacional do petróleo. **Boletim Trimestral de Preços e Volumes de Combustíveis**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/boletins-anp/btpvc-1/2020/boletim-trimestral-sdc-7-3t20.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2021.

_____. Agência nacional do petróleo. **Resolução ANP Nº 50 DE 23/12/2013**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=263587>. Acesso 21 set 2020.

ARAÚJO, C. A. Bibliometria: evolução histórica e questões atuais. **Em Questão**, v. 12, n. 1, p. 11-32, jan/jun., 2006.

BANCO MUNDIAL. Banco de dados do World Bank, 2021. Disponível em: <http://data.worldbank.org/>. Acesso em: 12 fev. 2021.

BANDEIRA, R. A. M.; GOES, G. V.; GONÇALVES, D. N. S.; D'AGOSTO, M. A.; OLIVEIRA, C. M. Electric vehicles in the last mile of urban freight transportation: A sustainability assessment of postal deliveries in Rio de Janeiro- Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v.67, p. 491-502 2019.

BASSO, R.; KULCSÁR, B.; SANCHEZ-DIAZ, I. Electric vehicle routing problem with machine learning for energy prediction. **Transportation Research Part B: Methodological**, v.145, p. 24-55, 2021.

BEN. Balanço Energético Nacional - **Empresa de Pesquisas Energéticas – EPE**, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>. Acesso 23/10/2020.

BOK, M. TAVASSZY, L.; THOEN, S. Application of an empirical multi-agent model for urban goods transport to analyze impacts of zero emission zones in The Netherlands. **Transport Policy**, 2020.

BOOGAARD, H., JANSSEN, N.A.H., FISCHER, P.H., KOS, G.P.A., WEIJERS, E.P. Impact of low emission zones and local traffic policies on ambient air pollution concentrations. **Science of the Total Environment**. v. 435-436, p.132 -140, 2012.

BORJESSON, M.; BASTIAN, A.; ELIASSON, J. The economics of low emission zones. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 153, p. 99-114, 2021.

BREUER, L.; SAM, R. M.; STOLTEN, S. D.; PETERS, R. How to reduce the greenhouse gas emissions and air pollution caused by light and heavy-duty vehicles with battery-electric, fuel cell-electric and catenary trucks. **Environment International**, v.152, 106474, 2021

BRYMAN, A. **Social research methods**. 5th ed. Oxford UK: Oxford University Press, 2016.

CAMILLERI, P.; DABLANC, L. An assessment of present and future competitiveness of electric commercial vans. **Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering**, v.7, pp.337-364, 2017.

CÁRDENAS, I.; BECKERS, J.; VANELSLANDER, T. “E-commerce last mile in Belgium: Developing an external cost delivery index”, **Research in Transportation Business & Management**, v. 24, pp. 123 – 129, 2017.

CAUCHICK-MIGUEL, Paulo A. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. **Elsevier**, 2018.

CETESB. Companhia ambiental do estado de São Paulo. **Qualidade do Ar, 2018**. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2019/07/Cetesb_QualidadeAr_2018R.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

CETESB. Companhia ambiental do estado de São Paulo. **Emissões veiculares no estado de São Paulo, 2020**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2020/11/Relatorio-Emissoes-Veiculares-no-Estado-de-Sao-Paulo-2019.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2020.

CETSP. Companhia de Engenharia de Tráfego do estado de São Paulo. **Resumo das circulações de caminhões em zonas restritas, 2018**. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/consultas/caminhoes/resumo-das-restricoes.aspx>

_____. Companhia de Engenharia de Tráfego do estado de São Paulo, 2016.
Portaria 031-16. Disponível em: <http://www.cetsp.com.br/media/466400/031-16.pdf>

CHUEKE, G. V.; AMATUCCI, M. O que é bibliometria? Uma introdução ao Fórum **Universidade de São Paulo–FEA/USP, São Paulo/SP, Brasil** - Escola Superior de Propaganda e Marketing -ESPM, São Paulo/SP, Brasil, 2015.

CITYLAB. What Other Cities Can Learn from the Failure of London's Low Emission Zone, 2017. Disponível em: <https://www.citylab.com/solutions/2015/09/what-other-cities-can-learn-from-the-failure-of-londons-low-emission-zone/403504>. Acesso: 23 ou de 2021.

CLARS, M. Charging, Low Emission Zones, other Access Regulation Schemes. Supported by the European Commission. **Urban Access Regulations In Europe**, 2019. Disponível em: <https://urbanaccessregulations.eu/countries-mainmenu-147/italy-mainmenu-81/milano-lez-area-b>

COMI, A., NUZZOLO, A. Exploring the relationships between e-shopping attitudes and urban freight transport. **Transportation Research Procedia**, v.12, p.399-412, 2016.

CRAINIC, T. G.; RICCIARDI, N.; STORCHI, G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. **Transportation Research Part C Emerging Technologies**, v. 12 n. 2, p.119-137, 2004

CURIEL-ESPARZA, J., MAZARIO-DIEZ, J.L., CANTO-PERELLO, J., MARTIN-UTRILLAS, M. Prioritization by consensus of enhancements for sustainable mobility in urban areas. **Environment Science Policy**, v.55 n.1, p. 248-257, 2016.

DABLANC, L.; RAKOTONARIVO, D. The impacts of logistics sprawl: how does the location of parcel transport terminals affect the energy efficiency of goods' movements in Paris and what can we do about it? **Processing Society Behavior Science**, v2 n.3, 2010.

DABLANC, Laetitia. Goods transport in large European cities: Difficult to organize, difficult to modernize. **Transportation Research A**, v.41, (3), p. 280 – 285, 2007.

DABLANC, Laetitia; GIULIANO, Genevieve; HOLLIDAY, Kevin; O'BRIEN, Thomas. Best practices in urban freight management: Lessons from an international survey. **Transportation Research Record (TRR)**, v. 2379, p. 29-38, 2013.

DAVIS Brian A.; FIGLIOZZI, Miguel A. A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v.49, n.1, 8–23, 2013.

DE OLIVEIRA, L.K.; LEITE NASCIMENTO, C.D.O.; DE SOUSA, P.R.; DE RESENDE, P.T.V.; FERREIRA DA SILVA, F.G. Transport service provider perception of barriers and urban freight policies in Brazil. **Sustainability**, v.11 n.24, 6890, 2019.

DIAS, J. M., SOBANSKI, G. B., SILVA, J. E. A. R., OLIVEIRA, L. K., & VIEIRA, J. G. V. Are Brazilian cities ready to develop an efficient urban freight mobility plan? **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.10, n.3, p.587-599, 2018

DUL, D.; CHOKCHAI, B. L. Greenhouse Gases Mitigation in the Road Transport towards 2050: Analyses of Selected Greater Mekong Sub-region (GMS) Countries. **International Energy Journal**, 2021.

EDGAR. Emissions Database for Global Atmospheric Research. European Commission. **Energy, Climate change, Environment**, 2020. Disponível em: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2020. Acesso 23/05/2021.

EDWARDS, Julia B.; MCKINNON, Alan C.; CULLINANE, Sharon L. Cullinane Comparative analysis of the carbon footprints of conventional and online retailing A “last mile” perspective. **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, v.40 (2), p.103-123, 2010.

EHRLER, V.C.; LOBIG, A.; RISCHKE, D. E-vehicles for urban logisticsd why is it not happening yet? Requirements of an innovative and sustainable urban logistics concept. **DLR Institute of Transport Research**, 2020.

EPL. Empresa de Planejamento energético. **Plano Nacional de Logística - PNL 2025**, 2018. Disponível em: <https://www.epl.gov.br/plano-nacional-de-logistica-pnl>. Acesso em: 27 mai. 2021.

EWBANK, H.; VIEIRA, J. G. V. FRANSOO, C. FERREIRA, M. A. The impact of urban freight transport and mobility on transport externalities in the SPMR, **Transportation Research Procedia**, v.46, p.101–10, 2020.

FENG, W., & FIGLIOZZI, M. An economic and technological analysis of the key factors affecting the competitiveness of electric commercial vehicles: A case study from the USA market. **Transportation Research Part C, Emerging Technologies**, v.26, p.135–145, 2013.

FIORI, C.; MARZANO, V. Modelling energy consumption of electric freight vehicles in urban pickup/delivery operations: analysis and estimation on a real-world dataset. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v.65, p.658–673, 2018.

GHANDRIZ, T.; JACOBSON, B.; ISLAM, M.; HELLGREN, J.; LAINE, L. Transportation-Mission-Based Optimization of Heterogeneous Heavy-Vehicle Fleet Including Electrified Propulsion. **Energies**, v.14, n.1, 2021.

GIL, Antonio Carlos. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7.ed. São Paulo: **Atlas**, 2019.

GIORDANO, A.; FISCHBECK, P.; MATTHEWS, H. S. Environmental and economic comparison of diesel and battery electric delivery vans to inform city logistics fleet replacement strategies. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v.64, p.216–229, 2018.

GIULIANO, G.; DESSOUKY, M.; DEXTER, S.; FANG, J.; HU, S.; MILLER, M. Heavy-duty trucks: The challenge of getting to zero. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, V. 93, 102742, 2021.

GOES, George Vasconcelos; SCHMITZ, Daniel Neves; BANDEIRA, Renata Albergaria de Mello; OLIVEIRA Cíntia Machado de; D'AGOSTO Márcio de Almeida. Sustentabilidade na última milha do transporte urbano de carga: o papel da eficiência energética do veículo. **Sustentabilidade em Debate - Brasília**, v. 9, n.2, p. 134-144, 2018.

GUERIN, L.; VIEIRA, J. G. V.; MAGALHAES, R. L. O. OLIVEIRA, K. L.; EWBANK, H. M. The geography of warehouses in the São Paulo Metropolitan Region and contributing factors to this spatial distribution. **Journal of Transport Geography**, v.91, 2021.

GUSMAO, A. C. S.; RIBEIRO, P. C. M. **Case Studies on Transport Policy - Guidelines for the efficiency of urban goods distribution: The Brazilian case.** v8, n.4, p.1478-1488, 2020.

HE, ZHANGYUAN Y.; HASSIS, HANS-DIETRICH. Integration of Urban Freight Innovations: Sustainable Inner-Urban Intermodal Transportation in the Retail/Postal Industry. **Sustainability**, v. 11, p. 1749 – 1774, 2019.

HENRIQUES, Rafaella Souza; SALDANHA, Rodney Rezende; COELHO, Lineker Max Goulart. An Air Pollutant Emission Analysis of Brazilian Electricity Production Projections and Other Countries, **Energies**, v.12 (15), 2851, 2019

HOLGUÍN-VERAS, J.; LEAL, J. A.; SÁNCHEZ-DIAZC, I.; BROWNE, M.; WOJTOWICZ, J. State of the art and practice of urban freight management Part I: Infrastructure, vehicle-related, and traffic operations. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 137, p. 360-382, 2020.

HOLMAN, C.; HARRISON, R. M.; QUEROL, X. Review of the efficacy of low emission zones to improve urban air quality in European cities. **Atmospheric Environment**, v. 111, p. 161-169. 2015.

HU, X.; CHEN, N.; WU, N.; YIN, B. The Potential Impacts of Electric Vehicles on Urban Air Quality in Shanghai City. **Sustainability**, v.13, n.4, 2021

IBAMA. Ministério do Meio Ambiente. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve), 2018. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=765. Acesso em 07 mai. 2021.

ICAVEL, 2020. **Ficha técnica Delivery**. Disponível em: <https://www.icavel.com/principal/novos/diversos/uploads/uploadsDOC/12072018155915Delivery-13.160.pdf>. Acesso: 07/08/2021.

IEA. Global EV Outlook 2019, **Scaling-Up the Transition to Electric Mobility**, 2019. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>. Acesso: 03 de set 2021.

IMRE, U.; CELEBI, D.; KOCA, F. Understanding barriers and enablers of electric vehicles in urban freight transport: Addressing stakeholder needs in Turkey. **Sustainable Cities and Society**, v.68, 102794, 2021.

IPCC. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. **Edited by Simon Eggleston et al. Hayama, JP: IGES**, 2006. v. 2, n. 3. Disponível em: http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_3_Ch3_Mobile_Combustion.pdf Acesso em: 18 ago. 2021.

IWAN, S.; ALLESCH, J.; CELEBI, D.; KIJEWSKA, K.; JENS, M. H.; ZAJICEK, K. J. Electric mobility in European urban freight and logistics – status and attempts of improvement. **Transportation Research Procedia**, v.39, p. 112-123, 2019.

JIAO, J.; HUANGA, Y.; LIAO, C. Co-benefits of reducing CO2 and air pollutant emissions in the urban transport sector: A case of Guangzhou. **Energy for Sustainable Development**, 2020.

JUAN, A. A.; MENDEZ, C. A.; FAULI, J.; DE ARMAS, J.; GRASMAN, S. E. Electric vehicles in logistics and transportation: A survey on emerging environmental, strategic, and operational challenges. **Energies**, v.9 n.7, 2016.

KARIMIPOUR, H. TAM, V.W.Y.; LE, K. N.; BURNIE, H. A greenhouse-gas emission reduction toolkit at urban scale Sustainable. **Cities and Society**, v.73, 103103, 2021

KIJEWSKA, K; OLIVEIRA, L. K.; SANTOS, O. R.; BERTONCINI, B. V.; IWAN, S.; EIDHAMMER, O. Proposing a tool for assessing the level of maturity for the engagement of urban freight transport stakeholders: A comparison between Brazil, Norway, and Poland. **Sustainable Cities and Society**, v.72, 2021.

KIN, B.; VERLINDE, S.; MACHARIS, C. Sustainable urban freight transport in megacities in emerging markets. **Sustainable Cities and Society**, v.32, p.31-41, 2017.

KNOWLES, R. D. FERBRACHE, F. NIKITAS, A. Transport's historical, contemporary and future role in shaping urban development: Re-evaluating transit oriented development. **Cities**, v.99, 102607, 2020.

LEBEAU, P.; MACHARIS, C.; VAN MIERLO, J.; How to improve the total cost of ownership of electric vehicles: An analysis of the light commercial vehicle segment. **World Electric Vehicle Journal**, v.10 n.4, 2019.

LEE, Dong Yeon; THOMAS Valerie M.; BROWN, Marilyn A. Electric Urban Delivery Trucks: Energy Use, Greenhouse Gas Emissions, and Cost-Effectiveness. **Environmental, Science & technology. Environ. Sci. Technol**, 47, 8022–8030, 2013.

LIN, Canhog; CHOY, K.L; HO, G.T.S; CHUNG S.H.; LAM H.Y. Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. **Expert System Applied**, v. 41, 1118–1138, 2014.

LIPMAN, Timothy E.; DELUCCHI, Mark A. Expected Greenhouse Gas Emission Reductions by Battery, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. **In book: Electric and Hybrid Vehicles**, p.113-158, 2010.

LIPMSMITH, William, J. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO2 emissions from transport? **Energy**, v.35, p. 4514 – 4521, 2010.

LONG, T.B.; BLOK, V.; CONINX, I. Barriers to the adoption and diffusion of technological innovations for climate-smart agriculture in Europe: evidence from the Netherlands, France, Switzerland and Italy. **Journal of Cleaner Production**, v.112, p.9–21, 2016.

LOSCHAU, E. G., WIEDENSOHLER, A., BIRMILI, W., RASCH, F., SPINDLER, G., MÜLLER, K., HAUSMANN, A., WOLF, U., SOMMER, W., ANHALT, M., DIETZ, V., HERRMANN, H., BOHME, € U., KATH, H.-G., KÜHNE, H. Umweltzone Leipzig. Abschlussbericht. Freistaat Sachsen, Landesamt Fur umwelt, landwirtschaft and geologie (**Saxon State Office for Environment, Agriculture and Geology**), Dresden, Germany, 2017. Disponível em: <https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/29757>.

MACHADO, B. P.; TEIXEIRA, L. RAMOSA, A. L.; PIMENTEL, C. Conceptual Design of an Integrated Solution for Urban Logistics using Industry 4.0. **Procedia Computer Science**, v.180, p. 807-815, 2021.

MARCONI. M.A.; LAKATOS, E. **Metodologia Científica**. 7.ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MARCUCCI, E., GATTA, V., POLIS, G.L. City Logistics landscape in the era of on-demand economy. **Main challenges, trends and factors influencing city logistics Lead Project – Lead Project, 2021**). Disponível em: https://www.leadproject.eu/wp-content/uploads/2021/02/LEAD_D1.1_City-Logistics-landscape-in-the-era-of-on-demand-economy-1.pdf

MARTINS-TURNER, K., GRAHLE, A., NAGEL, K., & GÖHLLICH, D. Electrification of urban freight transport-a case study of the food retailing industry. **Procedia Computer Science**, v. 170, p. 757–763, 2020.

MARTÍNEZ, M.; MORENO, A.; ANGULO, I; MATEO, C.; MASEGOSA, A D.; PERALLOS, A.; FRÍAS, P. Assessment of the impact of a fully electrified postal fleet for urban for urban freight transportation. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v.129 n.2, 106770, 2021.

MAURIZIO, Bielli; CAROTENUTO, Pasquale; DELLE, Vincense. Advanced Research on Transport-Environment Interactions. **IFAC Proceedings Volumes**. v.30, p.981-988, 1997.

MCCAFFERY, C.; ZHUA, H.; TANG, T.; LI, C.; KARAVALLAKISA, G.; CAO, S.; OSHINUGA, A.; BURNETTED, A.; JOHNSONA, K. C.; DURBINA, T. D. Real-world

NOx emissions from heavy-duty diesel, natural gas, and diesel hybrid electric vehicles of different vocations on California roadways. **Science of the Total Environment**, v.784, 147224, 2021.

MCKINNON, A.C. in A Research Agenda for Transport Policy eds. John Stanley and David A Hensher. **Edward Elgar**, p. 99-107, 2019.

MCTI. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. ANP aprova aumento do percentual de adição de biodiesel ao óleo diesel. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/rede-mcti/int/assuntos/int-na-midia/anp-aprova-aumento-do-percentual-de-adicao-de-biodiesel-ao-oleo-diesel-5>. Acesso: 23/05/2021.

MIRHEDAYATIAN, Seyed Mostafa; YAN, Shiyu. A framework to evaluate policy options for supporting electric vehicles in urban freight transport. **Transportation Research Part D**, v.58, 22-28, 2018.

MME. Ministerio de Minas e energia. O ministério. 2020. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/acesso-a-informacao/institucional/o-ministerio>. Acesso: 11 fev. 2021

MONAMI, E.; KOOIJMAN, S.; DUCHÂTEAU, H. Assessing and Mapping Urban Freight Distribution Initiatives. **Land Use and Transport**, p. 245-274, 2016.

MORGANTI, E.; BROWNE, M. Technical and operational obstacles to the adoption of electric vans in France and the UK: An operator perspective. **Transport Policy**, v. 63, p. 90–97, 2018

MULHOLLAND, E., TETER, J., CAZZOLA, P., MCDONALD, Z., Gallachóir, B.P.Ó. The long haul towards decarbonising road freight—A global assessment to 2050. *Applied Energy*, v.216, p.678–693, 2018.

MUÑOZ-VILLAMIZAR Andrés; MONTOYA-TORRES Jairo R; FAULIN, Javier. Impact of the use of electric vehicles in collaborative urban transport networks: A case study. **Transportation Research Part D** v.50, 40–54, 2017.

MUÑOZ-VILLAMIZAR, A.; QUINTERO-ARAÚJO, C. L.; MONTOYA-TORRES, J. R.; FAULIN, J. Short-and mid-term evaluation of the use of electric vehicles in urban freight transport collaborative networks: a case study. **International Journal of Logistics Research and Applications**, v.22, n.3, p.229–252, 2019.

MUÑUZURI, Jesus; LARRAÑETA, Juan; ONIEVA, Luis; CORTÉS, Pablo. Solutions applicable by local administrations for urban logistics improvement. **Cities**, v.22, n.1 p.15-28, 2005.

MUSOLINO, Giuseppe; RINDONE, Corrado; VITETTA, Antonino. Passengers and freight mobility with electric vehicles: A methodology to plan green transport and logistic services near port áreas. **Transportation Research Procedia**, v.37, p. 393-400, 2019.

- NANAKI, Evanthia A.; XYDIS, G. A.; KORONEOS, C. J. Electric vehicle deployment in urban áreas. **Indoor and Built Environment**, v,25(7), p.1065–1074, 2015.
- NAPOLI, G.; POLIMENI, A.; MICARI, S.; DISPENZA, G.; ANTONUCCI, V.; ANDALORO, L. Freight distribution with electric vehicles: A case study in Sicily. RES, infrastructures and vehicle routing. **Transportation Engineering**, v.3, 100047, 2021.
- NAVARRO, C.; ROCA-RIU, M.B., FURIÓ, S.; ESTRADA, M. Designing new models for energy efficiency in urban freight transport for smart cities and its application to the Spanish case. **Transportation Research Procedia**, v12, 2016, p. 314-324, 2016.
- NICOLAIDES, Doros; CEBON, David; MILES, John. An Urban Charging Infrastructure for Electric Road Freight Operations: A Case Study for Cambridge UK. **IEEE System Journal**, v.13, n.2, p. 2057 – 2068, 2019.
- NYKVIST, B.; OLSSON, O. The feasibility of heavy battery electric trucks. **Joule**, v.5 n.4, 2021.
- OCAMPO-GIRALDO, D. M.; GONZALEZ-CALDERON, C. A.; POSADA-HENAO, J. J. Assessment of trucking bans in urban areas as a strategy to reduce air pollution, **Journal of Transport & Health**, v.14, 100589, 2019.
- PANTELIADIS, P., STRAK, M., HOEK, G., WEIJERS, E., VAN DER, ZEE S., DIJKEMA, M. Implementation of a low emission zone and evaluation of effects on air quality by long-term monitoring. **Atmos. Environ.** V.86, 113e119, 2014.
- PATELLA, S. M.; GRAZIESCHI, G.; GATTA, V.; MARCUCCI, E.; CARRESE, S. The Adoption of Green Vehicles in Last Mile Logistics: A Systematic Review. **Sustainability**, v.13, n.1, 2021.
- PATTON, M.Q. **Qualitative research, and evaluation methods**. 4th ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2015.
- PELLETIER, Samuel; JABALI, Ola; LAPORTE, Gilbert. Charge scheduling for electric freight vehicles. **Transportation Research, B**, v. 115, p. 246-269, 2018.
- PERBOLI, G.; ROSANO, M. Parcel delivery in urban areas: Opportunities and threats for the mix of traditional and green business models. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 99, p. 19-36, 2019.
- PINTO, R.; LAGORIO, A. Supporting the decision-making process in the urban freight fleet composition problem, International Journal of Production Research. **International Journal of Production Research**, v.59 n.1, 2020
- QUAK, Hans; NESTEROVA, Nina. Towards zero emission urban logistics: challenges and issues for implementation of electric freight vehicles in city logistics. **Transport and Sustainability**, v.6, p. 265-294, 2014.

QUAK, Hans; NESTEROVA, Nina; ROOIJENI, Tariq Van. Possibilities and barriers for using electric-powered vehicles in city logistics practice. **Transportation Research Procedia**, v. 12, p. 157-169, 2016.

QUATRO RODAS. **Primeiro veículo elétrico da VW feito no Brasil é um caminhão de cerveja**, 2019. Disponível em: <https://quatorodas.abril.com.br/testes/primeiro-veiculo-eletrico-da-vw-feito-no-brasil-e-um-caminhao-de-cerveja>. Acesso 23 de mai de 2020

RABBANI, M.; TAHAEI, Z.; FARROKHI-ASL, H.; SARAVI, N. A. Using meta-heuristic algorithms and hybrid of them to solve multi compartment Vehicle Routing Problem. **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management**, p. 1022-1026, 2018

RANIERI, Luigi; DIGIESI, Salvatore; SILVESTRI, Bartolomeu; ROCCOTELLI, Michele. A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. **Sustainability**, v.10, n.3, 782-800, 2018.

RATHMANN, Régis; SZKLO, Alexandre, SCHAEFFER, Roberto. Targets and results of the Brazilian Biodiesel Incentive Program – Has it reached the Promised Land? **Applied Energy**, v. 97, p. 91-100, 2012.

RAUGEI, M.; KAMRAN, M.; HUTCHINSON, A. Environmental implications of the ongoing electrification of the UK light duty vehicle fleet. **Resources, Conservation and Recycling**, v.174, 105818, 2021.

REZGUI, D.; SIALA, J. C.; AGGOUNE-MTALAA, W.; BOUZIRI, H. Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles. **Computers & Industrial Engineering**. v.130, p.537-550, 2019.

RIBEIRO, Suzana Kahn; de Mattos, Laura Bedeschi Rego – A importância do Setor de Transporte Rodoviário no Aquecimento Global – O Caso da Cidade do Rio de Janeiro. **COPPE**. Rio de Janeiro, 2001.

RIENSTRA, Sytze A.; PETER, Nijkamp. The role of electric cars in Amsterdam's transport system in the year 2015; a scenario approach. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v.3 (1), p. 29-40, 1998.

RIZZA, V; TORRE, M; TRATZI, P; FAZZINI, P; TOMASSETTI, L; COZZA, V; NASO, F; MARCOZZI, D; PETRACCHINI, F. Effects of deployment of electric vehicles on air quality in the urban area of Turin (Italy). **Journal Environment Manage**, v. 297, 2021

RIZET, Christophe; THU, Thi Hoai. Economic Cost of Urban Freight GHG Mitigation. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v-879, p.394-401, 2019.

ROUMBOUTSOS, Athena; KAPROS, Seraphim; VANELSLANDER, Thierry. Green city logistics: Systems of Innovation to assess the potential of E-vehicles. **Research in Transportation Business & Management**, v.11, p.43–52, 2014.

SAKAI, T.; BEZIAT, A.; HEITZ, A.; Location factors for logistics facilities: location choice modeling considering activity categories. **Journal Transport Geographic** v. 85, 102710, 2020.

SCHIFFER, M.; KLEIN, P.; LAPORTE, G.; WALTHER, G. Integrated planning for electric commercial vehicle fleets: A case study for retail mid-haul logistics networks. **European Journal of Operational Research**, v.291, p. 944-960, 2020.

SCORRANO, M.; DANIELIS, R.; GIAN SOLDATI, M. Electric Light Commercial Vehicles for a Cleaner Urban Goods Distribution. Are They Cost Competitive? **Research in Transportation Economics**, v.85, 2021.

SEEG. **Monitor Elétrico, 2020**. Disponível em: <http://monitoreletrico.seeg.eco.br/pages/database>. Acesso 23 mai. 2021

SENGER, E. W.; SANTOS, A. P. L.; MARQUES, A. A. M.; SCHEER, S.; WERNECK. Stakeholder perceptions of offsite construction techniques: systematic review. **Ambient. constr.** V.20, n.4, 2020

SIKOVA, M.; BERGH, V. D. J. Optimal urban form for global and local emissions under electric vehicle and renewable energy scenarios. **Urban Climate**. v. 29, 100472, 2019.

SOUZAa, Lidiane La Picirelli; LORA, Electo Eduardo Silva; PALACIO José Carlos Escobar; ROCHA, Mateus Henrique.; RENÓ, Maria Luiza Grillo; VENTURINI, Osvaldo José; Comparative environmental life cycle assessment of conventional vehicles with different fuel options, plug-in hybrid and electric vehicles for a sustainable transportation system in Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v.203, p.444 - 468, 2018.

SOUZAb, C. O.; D'AGOSTO, M. A.; BANDEIRA, R. A. M.; ALMEIDA, I. R. P. L. Soluções para o transporte urbano de cargas na etapa de última milha. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v.12, e20190138, 2020.

SP. Prefeitura de São Paulo, 2007. **Decreto 4338/2007**. Disponível em: <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-48338-de-10-de-maio-de-2007/#:~:text=Estabelece%20normas%20para%20a%20realiza%C3%A7%C3%A3o,e%20Vias%20Estruturais%20Restritas%20VER>.

SP.GOV. **Decreto 56920/2016**. Estabelece conceitos e normas para o trânsito de caminhões no Município de São Paulo. Disponível em: <http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/leis/decreto-56920-de-08-de-abril-de-2016>

SULABH, S.; DEB, S.; SINGH, S. N. Different charging infrastructures along with mart charging strategies for electric vehicles. **Sustainable Cities and Society**, v.60, 102238, 2020.

TAEFI, T.; KREUTZFELDT, J.; HELD, T.; KONINGS, R.; KOTTER, R.; LILLEY, S.; BASTER, H.; GREEN, N., LAUGESEN, M. S.; JACOBSSON, S.; BORGQVIST, M.; NYQUIST, C. Comparative analysis of European examples of freight electric vehicles schemes—a systematic case study approach with examples from Denmark, Germany, the Netherlands, Sweden and the UK - **Dynamics in Logistics**

Proceedings of the 4th International Conference LDIC, Bremen, Germany, p. 495-504, 2013.

TAEFIA, T. T.; STÜTZC, S.; FINK, A. Assessing the cost-optimal mileage of medium-duty electric vehicles with a numeric simulation approach. **Transportation Research Part D**, v.56, p.271–285, 2017.

TARTAKOVSKY, D.; BIEZUNER, L. K.; BERLIN, E.; BRODAY, D. M.; Air quality impacts of the low emission zone policy in Haifa. **Atmospheric Environment**. v.232, 117472, 2020.

TEOH, T.; KUNZE, O.; TEO, C.; WONG, Y. D. Decarbonization of Urban Freight Transport Using Electric Vehicles and Opportunity Charging. **Sustainability**, v.10, 3258, 2018.

TRUMMER, W., HAFNER, N. Potentials of e-Mobility for Companies in Urban Areas, **Commercial Transport**. Lecture Notes in Logistics, p 129-139, 2016.

TSAKALIDIS, A.; KRAUSE, J.; JULE, A.; PEDUZZI, E.; PISONI, E.; THIEL, C. Electric light commercial vehicles: Are they the sleeping giant of electromobility? **Transportation Research Part D**, 2020.

VELAZQUEZ, LUIS; NORA, E. Munguia; MARKUS, Will; ANDREA, G. Zavala; SARA, Patricia Verdugo; BERND, Delakowitz; BIAGIO, Giannetti. Sustainable transportation strategies for decoupling road vehicle transport and carbon dioxide emissions. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v.26, (3), p. 373-388, 2015.

VIEIRA, E. M.; FRANCISCO, F. R.; BANDEIRA, R. A. M.; SILVA JUNIOR, O. S.; D'AGOSTO, M.; VIEIRA, J. G. V. Government measures for urban freight transport: perceptions on Brazilian scenario. **urbe, Rev. Bras. Gest. Urbana**, v.13, 2021

VLEUGEL, J. M.; BAL, F. Regional goods delivery: how to reduce its CO₂-, NO_x- and PM₁₀-emissions? **International Journal of Energy Production & Management**, v.3, n.4, p. 338–347, 2018.

VOSVIEWER. **Visualizing Scientific Landscape**, 2021. Disponível em: <https://www.vosviewer.com/>. Acesso em: 23/09/2021.

WU, D.; LIN, J. C.; ODA, T.; KORT, E. A. Space-based quantification of per capita CO₂ emissions from cities. **Environmental Research Letters**, v.15, 035004, 2020.

WU, Ya; ZHANG, Li. Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? **Transportation Research Part D**, v.51, p.129–145, 2017.

XING, Yi; SONG, Hongqing; YU, Mingxu; WANG, Cheng; ZHOU, Yang; LIU, Guanghui; Du, li; The characteristics of greenhouse gas emissions from heavy-duty trucks in the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) region in China. **Atmosphere**, v.7, n.9, p 121-134, 2016.

YIN, R.K. **Case study research and applications: Design and methods.** 6th ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2017.

ZANNI, Alberto M.; BRISTOW, Abigail L. Emissions of CO₂ from road freight transport in London: Trends and policies for long run reductions, **Energy Policy**, v.38 (4) p.1774-1786, 2010.

ZHANG, R.; ZHANG, J.; LONG, Y.; WU, W.; LIU, J.; JIANG, Y. Long-term implications of electric vehicle penetration in urban decarbonization scenarios: An integrated land use–transport–energy model, **Sustainable Cities and Society**, v.68, 102800, 2021

ZHAO, Z.; LI, X.; ZHOU, X. Distribution Route Optimization for Electric Vehicles in Urban Cold Chain Logistics for Fresh Products under Time-Varying Traffic Conditions. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 20, 9864935, 2020