

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA EM TRANSPORTES E LOGÍSTICA

FELIPE GOI ROECKER

ANÁLISE DA EMISSÃO DE POLUENTES EM SISTEMAS DE ENTREGAS DE  
ÚLTIMA MILHA COM UTILIZAÇÃO DE DRONES E FURGÕES

Joinville

2023

FELIPE GOI ROECKER

ANÁLISE DA EMISSÃO DE POLUENTES EM SISTEMAS DE ENTREGAS DE  
ÚLTIMA MILHA COM UTILIZAÇÃO DE DRONES E FURGÕES

Trabalho apresentado como requisito para  
obtenção do título de bacharel em  
Engenharia de Transportes e Logística,  
no Centro Tecnológico de Joinville, da  
Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientadora: Dra. Silvia Lopes de Sena  
Tagliarenha

Joinville

2023

FELIPE GOI ROECKER

ANÁLISE DA EMISSÃO DE POLUENTES EM SISTEMAS DE ENTREGAS DE  
ÚLTIMA MILHA COM UTILIZAÇÃO DE DRONES E FURGÕES

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia de Transportes e Logística, no Centro Tecnológico de Joinville, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Joinville (SC), 30 de novembro de 2023.

**Banca Examinadora:**

---

Dra. Silvia Lopes de Sena Tagliapietra  
Orientadora/Presidente

---

Dr. Catia Regina Silva de Carvalho Pinto  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Me. Natan Bissoli  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

Dedico este trabalho primeiramente aos meus pais, Clair e Laudelino, por seu amor incondicional, por todo o apoio de uma vida, e pelo enorme esforço para termos uma vida melhor. Ao meu irmão, Rudinei, pelo companheirismo. À minha prima, Mariéli, por sua amizade, a qual levarei para toda a vida. Dedico também aos professores-orientadores, Prof<sup>ª</sup>. Sílvia e Prof. Helry, pelo imprescindível apoio e orientação para com este trabalho.

“Inovação é a habilidade de ver a mudança como uma oportunidade, não uma ameaça” Steve Jobs.

## RESUMO

A busca em se melhorar a logística, e a necessidade de entregar pedidos com mais rapidamente e com menor taxa de erro motiva o desenvolvimento contante de diversas inovações. Também, a crescente preocupação com o meio ambiente demanda diversas ações para reduzir os níveis de emissões de poluentes atmosféricos. Este trabalho considera o problema de sistemas de entregas de última milha, com utilização conjunta de drones e furgões como uma possibilidade para diminuição da emissão de gases do efeito estufa, e de diminuição do tempo total de entrega. Com a aplicação da metodologia PRISMA para revisão bibliográfica, investigam-se metodologias de análise para emissão de poluentes. Encontrou-se, na literatura, resultados de redução de custo entre 12% a 26%, e da emissão de poluentes em gCO<sub>2</sub>e de 46,16% com a utilização de entregas com drone e caminhão. Aplicam-se modelos de otimização para proposições de diferentes cenários que utilizem sistemas de entregas somente com drones, somente com caminhões, e sistemas mistos com drones e com caminhões, e realizam-se análises de emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e material particulado, além da análise das emissões convertidas para CO<sub>2</sub>e. Os experimentos com a aplicação da metodologia proposta mostram que, para os cenários considerados no estudo, com utilização de sistemas de entregas com drones e caminhão, foi possível obter uma redução de 38,89% no tempo de entrega total, e uma redução de 35,32% nas emissões de CO<sub>2</sub>e, se comparados ao sistema que utiliza somente caminhões.

**Palavras-chave:** Truck-Drone Routing Problem. Last mile. Greenhouse gases.

## ABSTRACT

The search to improve logistics, and the necessity to deliver orders more rapidly and with a smaller rate of error motivates the constant development of many innovations. Also, the increasing concern with the environment demands many actions to reduce the levels of atmospheric pollutants emissions. This work considers the problem of last mile delivery systems, with the joint utilization of drones and vans as a possibility to reduce greenhouse effect gases, and to reduce the total delivery time. With the application of the PRISMA methodology for literature review, analysis methodologies for pollutant emissions were investigated. It was uncovered, in the literature, results for cost reduction between 12% to 26%, and gCO<sub>2</sub>e pollutant emissions of 46,16%. Optimization models for the proposal of different scenarios were applied, which utilize delivery systems only with drones, only with trucks, and mixed systems with drones and trucks, in which CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particulate material emissions were investigated, as were the converted emissions to CO<sub>2</sub>e. The experiments with the application of the proposed methodology show that, for the considered scenarios in the study, with the use of delivery systems with drones and truck, it was possible to obtain a reduction of 38.89% in the total delivery time, and a reduction of 35.32% in CO<sub>2</sub>e emissions, if compared to the truck only system.

**Keywords:** Truck-Drone Routing Problem. Last mile. Greenhouse gases.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Foto do drone da Zipline realizando uma entrega.....	21
Figura 2 – Drone de entregas da Amazon Prime Air.....	21
Figura 3 – Drone da DroneUP, utilizado pela Walmart.....	22
Figura 4 – Drone da Speedbird e seu respectivo veículo de apoio.....	22
Figura 5 – Divisão das emissões nos Estados Unidos da América, em 2021.....	25
Figura 6 – Caminho realizado pelo caminhão no cenário 1.....	30
Figura 7 – Caminhos realizados pelo caminhão e drone no cenário 3.....	30
Figura 8 – Exemplo descrevendo uma operação.....	32
Figura 9 – Etapas da metodologia aplicada para obtenção dos resultados.....	39
Figura 10 – Grafo representando o conjunto com 9 nós do PCV-D.....	51
Figura 11 – Grafo do caminho percorrido pelo drone no Cenário ESP, com 4 nós...	52



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de emissão para Veículos pesados com motores do ciclo Diesel, em 2021.....	26
Tabela 2 – Matriz elétrica no Brasil, em 2022.....	26
Tabela 3 – Emissões de gases de efeito estufa para diferentes fontes de geração de energia.....	28
Tabela 4 – Distância percorrida pelo furgão e o drone, e a redução percentual em relação ao modelo PCV somente furgão.....	53
Tabela 5 – Cálculo dos fatores de emissão de poluente para o furgão.....	53
Tabela 6 – Cálculo dos fatores de emissão de poluente para o drone.....	54
Tabela 7 – Cálculo das diferenças de emissão entre cenários.....	54

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BVLOS – Beyond Visual Line of Sight

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH<sub>4</sub> – Metano

CO<sub>2</sub> – Dióxido de carbono

CO<sub>2e</sub> – Equivalente em CO<sub>2</sub>

ESD – Entrega Somente com Drone

FO – Função Objetivo

GWP – Potencial de Aquecimento Global

LCV – Veículo Comercial Leve

MP – Material particulado

MP<sub>2.5</sub> – Material particulado de 2,5µm

MP<sub>10</sub> – Material particulado de 10µm

N<sub>2</sub>O – Óxido nitroso

NO<sub>x</sub> – Óxidos de nitrogênio

PBT – Peso Bruto Total

PCV – Problema do caixeiro viajante

PCV-D – Problema do Caixeiro Viajante com Drone

VTOL - Decolagem e Pouso Vertical

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 OBJETIVOS.....	14
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>14</b>
<b>1.1.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>14</b>
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	15
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>16</b>
2.1. REVISÃO SISTEMÁTICA E METODOLOGIA PRISMA.....	16
2.2. BREVE HISTÓRICO DA LOGÍSTICA.....	17
2.3. DRONES.....	19
<b>2.3.1 Definição</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3.2. Exemplos de aplicações de drones para entregas</b> .....	<b>20</b>
2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS.....	23
<b>2.4.1. Efeito estufa</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4.2. Composição das emissões do diesel</b> .....	<b>25</b>
2.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL.....	26
2.6. ESTUDOS QUE CONSIDERAM ENTREGAS COM USO DE DRONES.....	27
2.7 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS.....	30
<b>2.7.1 Modelo PCV-D</b> .....	<b>31</b>
<b>2.7.2 Modelo PCV somente furgão</b> .....	<b>36</b>
<b>2.7.3 Modelo ESD</b> .....	<b>38</b>
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>39</b>
3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	40
3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	40
3.3 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS.....	42
<b>3.3.1 Metodologia de resolução com Modelos alterados</b> .....	<b>42</b>
<b>3.3.2 Modelagem do sistema ESD</b> .....	<b>44</b>
<b>3.3.3 Resolução dos Modelos utilizando AMPL e Gurobi</b> .....	<b>45</b>
3.4 MODELOS DE ANÁLISE DE EMISSÃO POR CENÁRIOS.....	46
3.5 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS.....	47
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>50</b>
4.1 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	50

<b>4.1.1 Resultados do modelo misto (PCV-D).....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2 Resultados do modelo somente furgão (PCV).....</b>	<b>51</b>
<b>4.1.3 Resultados do modelo ESD.....</b>	<b>52</b>
<b>4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3 EMISSÃO DE POLUENTES DOS MODELOS.....</b>	<b>53</b>
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE A – Diagrama de fluxo PRISMA 2020 aplicado para o trabalho.....</b>	<b>64</b>
<b>APÊNDICE B – Checklist PRISMA 2020.....</b>	<b>65</b>
<b>APÊNDICE C – Arquivo “model_modif.mod” em AMPL do modelo PCV-D.....</b>	<b>66</b>
<b>APÊNDICE D – Arquivo “data_modif.dat” em AMPL do modelo PCV-D.....</b>	<b>67</b>
<b>APÊNDICE E – Arquivo “commands_modif.run” em AMPL do modelo PCV-D.....</b>	<b>68</b>
<b>APÊNDICE F – Arquivo “data_truck.dat” em AMPL do modelo PCV somente furgão.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE G – Arquivo “model_truck.mod” em AMPL do modelo PCV somente furgão.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE H – Arquivo “commands_truck.run” em AMPL do modelo PCV somente furgão.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE I – Arquivo “model_truck2.mod” em AMPL do modelo PCV somente furgão.....</b>	<b>72</b>
<b>APÊNDICE J – Arquivo “model_truck3.mod” em AMPL do modelo PCV-D.....</b>	<b>73</b>
<b>ANEXO A – Fluxograma PRISMA 2020.....</b>	<b>74</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A logística desempenha papel essencial à sociedade contemporânea, pois transportar produtos com confiabilidade e rapidez é uma necessidade. Além disso, há uma crescente preocupação com o meio ambiente, e o uso conjunto de drones e veículos terrestres é uma possível solução para amenizar os efeitos da emissão de gases poluentes.

Essa preocupação se deve ao fato de que, a cada década, a temperatura da superfície terrestre aumenta em 0,18 °C desde 1981, e no ano de 2016 registrou-se uma temperatura 0,99 °C acima da temperatura média registrada em 1880, conforme NOAA (2022), e 1,1 °C acima dos níveis do período pré-revolução industrial, e esse aumento da temperatura global é causado pelo efeito estufa, conforme European Commission (2023).

O efeito estufa é o aprisionamento de calor próximo da superfície da Terra e é causado por gases como metano, óxidos nitrosos, vapor de água e principalmente dióxido de carbono, os quais são essenciais para manter a estabilidade do efeito estufa, conforme National Geographic (2023). Mas, a partir da Revolução Industrial do final dos anos 1700, uma quantidade maior de gases do efeito estufa foram emitidas pela humanidade, levando ao aumento da temperatura do planeta (National Geographic, 2023).

Alguns estudos têm utilizado ferramentas de pesquisa operacional para propor modelos matemáticos para tratar a problemática de analisar os efeitos de emissão de gases. Por exemplo, nos trabalhos de Bányai (2022) e Baldisseri et al. (2021) os autores abordam a temática de entregas conjuntas com veículos terrestres e drones analisando a redução em emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) Destaca-se que nestes trabalhos, não foram consideradas análise a respeito dos óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) e material particulado (MP).

Também, é necessária uma análise da redução de emissões para um caso real com múltiplos veículos e pontos de entrega, visto que os trabalhos de Bányai (2022) e Baldisseri et al. (2021) focam em casos experimentais com múltiplos

veículos e pontos de entrega, porém as análises apresentadas foram realizadas de maneira limitada.

Ademais, nota-se que aplicações de entregas utilizando drones já existem, como é o caso da Zipline, conforme Ackerman (2019), a qual atua em entregas em zonas rurais. Para entregas urbanas, é notado que o uso de drones em conjunto de drones, conforme abordado por Baldisseri et al. (2022) e Bányai (2022), torna-se a opção mais viável.

Agatz, Bouman e Schimdt (2015) propõe modelos de otimização para o problema do caixeiro viajante com drones (PCV-D), enquanto Baldisseri et al. (2022) e Bányai (2022) consideram, além da análise de otimização para o problema de viagens conjuntas com furgões e drones, ou PCV-D, também realizam uma estimativa das emissões de CO<sub>2</sub>.

Então, notando-se a necessidade de uma avaliação mais detalhada da emissão de poluentes e a aplicação de um algoritmo exato de otimização, torna-se justificável a realização deste trabalho, cujos objetivos são destacados a seguir.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Aplicar ferramentas de Pesquisa Operacional para auxiliar na análise da emissão de poluentes em diferentes cenários em entregas do tipo última milha.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral proposto, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Aplicar o modelo do caixeiro viajante para determinar diferentes cenários para análise;
- Aplicar modelos matemáticos que considerem modelos mistos de entrega para determinar diferentes cenários;
- Analisar o tempo de viagem da rede para diferentes cenários;

- Analisar o impacto da redução da distância do trajeto na emissão de poluentes;
- Analisar o impacto de diferentes sistemas de entrega na emissão de poluentes;
- Analisar as emissões de CO<sub>2</sub>, NOx e materiais particulados.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em cinco capítulos ao todo, com esse capítulo introdutório.

No Capítulo 2, realiza-se a fundamentação teórica do trabalho, abordando a respeito da revisão bibliográfica com a metodologia PRISMA, um breve histórico da logística, a definição e os tipos de drones existentes, um subcapítulo abordando sobre impactos ambientais e emissões de poluentes, além da análise de estudos sobre entregas com drones, além dos modelos utilizados na análise.

No Capítulo 3, é descrita a metodologia de resolução do trabalho, abordando sobre a definição do problema, a revisão bibliográfica, os métodos de solução utilizados e sua aplicação e, por fim, a metodologia aplicada para obter os resultados e as considerações finais.

No Capítulo 4, são abordados os resultados dos modelos utilizados, e a análise dos resultados obtidos.

Por fim, o Capítulo 5 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção do trabalho é apresentada uma breve descrição da metodologia PRISMA, utilizada para revisão sistemática sobre o tema aqui em estudo neste trabalho, um breve histórico sobre a logística, além das pesquisas e informações que fundamentam e orientam a análise e as possíveis resoluções do problema.

### 2.1. REVISÃO SISTEMÁTICA E METODOLOGIA PRISMA

A revisão sistemática em um trabalho acadêmico é essencial para que se analise coerentemente um assunto a ser estudado. Segundo EPPI (2023), a revisão sistemática foi primeiramente utilizada como o termo meta-análise, em trabalhos nas áreas de psicoterapia e tamanho de turmas de aula. Tem-se, então, que meta-análise é “um método para sistematicamente combinar dados de estudos qualitativos e quantitativos” (Himmelfarb Health Sciences Library, 2023, tradução própria).

Porém, diferentes estudos entre 1987 e 1996 encontraram relatórios de revisão ruins ou sub ótimas, segundo PRISMA (2023a), e em 1999, a fim de solucionar a falta de qualidade das revisões surgiu o QUORUM Statement, ou Qualidade dos Relatórios de Meta-análise, que focou em relatórios analisando ensaios aleatórios controlados, conforme PRISMA (2023a, apud Sacks et al., 1996).

Em 2009, esta metodologia foi atualizada, atendendo avanços em práticas e conceitos na ciência das revisões sistemáticas, e renomeada para Itens de relatório Preferidos de Revisões Sistemáticas e Meta-análises (PRISMA), conforme PRISMA (2023a), sendo novamente atualizado em 2017, seguindo avanços na metodologia e terminologia de revisões sistemáticas. Em 2021, foi publicada a última versão da metodologia, denominada PRISMA 2020, conforme PRISMA (2023a).

Assim, a metodologia PRISMA é definida como “um conjunto mínimo de itens embasados em evidências para relatórios em revisões sistemáticas e meta-análises” (PRISMA, 2023b, tradução própria). Segundo Page et al. (2021, p. 181), a



declaração PRISMA 2020 contém um checklist com 27 itens, alguns com sub-itens, além de um checklist para revisão sistemática de resumos em periódicos e conferências, e um diagrama de fluxo, que resume os trabalhos acadêmicos encontrados.

A aplicação da metodologia PRISMA nesse trabalho é apresentada na seção 3.1. O diagrama de fluxo da metodologia é apresentado no Anexo A, e o checklist para revisão sistemática, no Apêndice B.

## 2.2. BREVE HISTÓRICO DA LOGÍSTICA

Ao longo da história da humanidade, a logística teve um papel indispensável dentro da dinâmica social e militar. Segundo Roth (1998), o termo logística deriva do grego *logistikê*, ou a arte do cálculo, e se referia a qualquer aspecto estratégico ou operacional baseado em cálculo quantitativo, dentro do âmbito militar.

Porém, a logística teve uma definição consolidada somente a partir da década de 1960, conforme Ballou (2006), com a publicação do livro-texto “Physical Distribution Management: Logistic Problems of the Firm” em 1961, que tratou dos benefícios da gestão logística coordenada. Ainda, o Council of Supply Chain Management teve uma visão mais generalista sobre a logística, definindo que:

“Logística é o processo de planejar, implementar e controlar de maneira eficiente o fluxo e a armazenagem de produtos, bem como os serviços e informações associados, cobrindo desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de atender aos requisitos do consumidor (Novaes, 2007)”.

É uma definição ainda válida atualmente, porém os requisitos do consumidor não são estáticos. Em 1872, surgiu a Montgomery Ward, a primeira companhia de vendas por catálogos, conforme Montgomery Wards (2023) e que tinha como objetivo suprir uma demanda por maior variedade de produtos se comparado às general stores nos Estados Unidos, de acordo com Novaes (2007).

A venda por catálogos também se adaptou às necessidades das pessoas, e por mais que ainda exista, em grande parte foi substituída pelo e-commerce, com suas origens datando entre 1948 e 1949 com o sistema telex, para atender a pedidos da cidade de Berlim, conforme Zwass (2023).

Porém, o e-commerce pela Internet apenas se iniciou em 1993, com o lançamento do primeiro navegador para Internet, e que teve o lançamento do

primeiro marketplace da Internet, a Amazon, que iniciou como um website de vendas exclusivamente de livros, mas passou a vender inúmeros tipos de produtos, passando a ter como objetivo “simplificar transações online para consumidores” (Hall, 2023. Tradução própria).

O crescimento do e-commerce está também atrelado às suas vantagens. De acordo com Novaes (2007), as vantagens desse modelo são a exposição imediata de produtos e serviços em nível nacional e internacional, a relação agilizada entre consumidor e vendedor, além do aumento ao acesso à informação por parte do consumidor.

Além disso, o consumidor exige uma maior agilidade na entrega após a compra, por conta das pessoas se sentirem cada vez mais pressionadas em relação ao tempo (Goodin et al., 2005). Concomitantemente, serviços de entregas rápidas se tornaram mais comuns, citando-se a FedEx, que introduziu o conceito hub-and-spoke, o que possibilitou à empresa realizar entregas expressas, conforme Novaes (2007).

E dentro da área da logística urbana de última milha, a última grande inovação são as entregas com drones, que tiveram seu início em 2013, com uma das primeiras entregas documentadas realizada pela DHL, a qual realizou uma entrega de medicamentos utilizando um drone autônomo na cidade de Bonn, na Alemanha (Fuest, 2013), e também com o anúncio do Amazon Prime Air, um serviço comercial de entregas com drones autônomos (Barr, 2013).

Dentro do contexto de entregas urbanas, é necessário entender os conceitos de primeira e última milha. De acordo com Boysen, Fedtke e Schwerdfeger (2021, tradução própria), o termo última milha se refere às atividades logísticas relacionadas à distribuição de cargas, as quais iniciam quando um carregamento chega a um determinado ponto em uma área urbana (depósito), e termina com a entrega da carga a um cliente. Já a primeira milha é a parte da entrega onde um determinado produto é retirado de uma fábrica e levado a um depósito (ePowerTrucks, 2021).

## 2.3. DRONES

Os drones possuem diversas aplicações atualmente, como a utilização em entregas de mercadorias, fotografia e uso recreacional e, para entender melhor o que é um drone, apresenta-se as definições de dicionário e as definições técnicas.

### 2.3.1 Definição

Merriam-Webster (2023) define que a palavra drone se refere a uma embarcação ou aeronave não tripulada, controlado por um computador embarcado ou por controle remoto. Herrick (2017) afirma que os termos drone e veículo aéreo não tripulado (VANT), ou unmaned aerial vehicle (UAV) em inglês, são termos geralmente intercambiados. No entanto, o autor ressalta que a terminologia drone vale para qualquer aplicação de um veículo operado remotamente ou autonomamente.

Partindo desse esclarecimento, a embarcação criada por Nikola Tesla em 1898, medindo cerca de 4 pés e com controle remoto via rádio, é considerada como uma das primeiras aplicações de drone a se ter registro, conforme Turi (2019). Já o De Havilland DH82B Queen Bee, criado em 1935, foi a primeira aeronave a ser considerada um drone, conforme Daly (2023). Assim como a embarcação de Tesla, era operada remotamente via rádio, e foi utilizada como uma forma de baixo custo para treinamento antiaéreo, conforme De Havilland Museum (2023).

Existem diversos tipos de drones, que são definidos pelo seu tamanho e tipo de construção. Drone Trest (2023) classifica os drones em 4 tamanhos distintos, por peso:

- Nano, com peso menor que 250 gramas;
- Micro, com peso entre 250 gramas e 2 quilogramas;
- Pequeno, com peso entre 2 quilogramas e 25 quilogramas;
- Médio, com peso entre 25 quilogramas e 150 quilogramas;
- Grande, com peso maior que 150 quilogramas;

A classificação por tipo de construção também é definida em quatro tipos distintos, sendo esses tipos, suas vantagens e desvantagens, apresentados no

Quadro 1. A Decolagem e Pouso Vertical (VTOL) e o voo pairado são condições possíveis de voo do drone, sendo que no voo pairado, ou táxi lento de superfície, o rotor gera ventos descendentes que produzem vórtices, os quais circulam em todas as direções para longe do rotor (ANAC, 2012).

Quadro 1 – Tipos de drones existentes

Tipo de drone	Pontos positivos	Pontos negativos
Multi-rotore	Acessibilidade Facilidade de uso Voo VTOL e pairado Pode operar em áreas confinadas	Curto tempo de voo  Capacidade pequena de carga útil
Asa fixa	Autonomia de voo maior Maior área de cobertura Velocidade rápida de voo	Lançamento e recuperação precisam de muito espaço Voo VTOL ou pairado não é praticável Mais difíceis de voar, necessitam de mais treinamento Caros
Rotor único	VTOL e voo pairado Autonomia de voo maior (com motor a combustão) Capacidade de carga útil maior	Mais perigosos Mais difíceis de voar, necessitam de mais treinamento Caros
Híbrido de asa fixa	VTOL Autonomia de voo maior	Desempenho mediano em voo pairado e voo à frente Ainda em desenvolvimento

Fonte: Adaptado de Rennie (2016).

### 2.3.2. Exemplos de aplicações de drones para entregas

De acordo com Ackerman (2019), a Zipline tem como foco a entrega de sangue e suprimentos médicos com a utilização de drones de asa fixa, conforme a Figura 1, atendendo 25 hospitais remotos em Ruanda, em um raio de até 80 quilômetros. A empresa opera comercialmente desde 2016, e já percorreu mais de 50 milhões de milhas comerciais nesse período (Zipline, 2023).

Conforme apresentado por Ackerman (2019), os pedidos realizados são entregues em menos de meia hora, por meio de lançamento aéreo, sendo que a mesma entrega poderia levar até 5 horas, realizando o trajeto por estrada.

Figura 1 – Foto do drone da Zipline realizando uma entrega



Fonte: Latam Mobility (2023).

O Amazon Prime Air teve seus testes iniciados em 2013, conforme citado na seção 2.2, porém realizou as primeiras entregas comerciais somente no final de 2022, conforme Palmer (2023) e LinkedIn (2023), operando com drones multi-rotor, conforme a figura 2. A expectativa era realizar 10 mil entregas em 2023, porém, até a presente data desse trabalho, apenas cerca de 100 entregas foram realizadas, conforme The Verge (2023).

O Walmart é outra companhia que está testando o uso de drones da DroneUp para entregas de última milha, sendo o drone do tipo multi-rotor, conforme a Figura 3. Conforme Freight Waves (2022), o drone realiza entregas para pacotes de até 4,5 kg, em uma distância máxima de 2,4 quilômetros.

Figura 2 – Drone de entregas da Amazon Prime Air



Fonte: Dukowitz (2023).

Figura 3 – Drone da DroneUP, utilizado pela Walmart



Fonte: Muller (2022).

No Brasil, a Speedbird Aero é “a principal especialista em logística aérea não tripulada nacional (Basseto, 2023)”. A empresa, fundada por Samuel Salomão e Manoel Coelho, opera também nos Estados Unidos, em Israel e no Reino Unido, sendo a primeira empresa brasileira a operar além da linha de alcance visual, ou beyond visual line of sight (BVLOS), em inglês, realizando entregas de material biológico em até 25 km entre hospitais na região norte do Brasil, conforme Basseto (2023).

De acordo com Drska (2022), a empresa ainda negocia em torno de 100 aeronaves com o mercado estadunidense, e também iniciará operações na América Latina, por meio de contrato com uma empresa de aviação, iniciando o serviço na Argentina e no Peru. Um dos drones utilizados pela empresa é o DLV-2, com uma carga máxima de 6kg e uma autonomia de 16km, e podendo ter operação BVLOS, conforme Speedbird (2023).

Figura 4 – Drone da Speedbird e seu respectivo veículo de apoio



Fonte: Basseto (2023).

## 2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS

Nessa seção, são apresentados os diferentes tipos de poluentes causadores do efeito estufa, além dos outros poluentes emitidos por veículos a diesel, e seus efeitos para o meio ambiente e seres humanos.

### 2.4.1. Efeito estufa

Conforme Kweku et al. (2017), o efeito estufa é essencial para a vida existir confortavelmente, e é o que mantém a temperatura do planeta moderada. Então, o efeito estufa “mantém parte do calor do planeta que seria perdido da atmosfera para o espaço de outra forma” (Kweku et al., 2017, tradução própria) e, somente com a radiação solar, a temperatura na Terra seria de apenas  $-17^{\circ}\text{C}$ .

O efeito estufa é causado por diferentes tipos de gases. Segundo Kweku et al. (2017), os principais gases são o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) e os gases fluoretados, além do vapor de água, o qual contribui de maneira diferente para o efeito estufa. Kweku et al. (2017) desconsidera outros óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), e esse gases, por mais que o  $\text{NO}_x$  tenha um tempo de vida entre horas e dias na atmosfera, conforme Denman et al. (2007, p.9) apud Prather et al. (2001), o mesmo possui outros efeitos adversos.

Além disso, a ação humana em se tratando de emissões dos gases-estufa ocasionou um aumento global da temperatura. Segundo IPCC (2023, p. 42), a temperatura global da superfície do planeta Terra foi  $1.1^{\circ}\text{C}$  maior entre 2011 e 2020 comparado aos anos 1850 a 1900, havendo um aumento de 47% nas emissões de  $\text{CO}_2$ , 156% nas emissões de  $\text{CH}_4$  e 23% no aumento de  $\text{N}_2\text{O}$  desde 1750.

Buis (2022) explica que o vapor de água atua em um ciclo de retorno positivo em conjunto com gases do efeito estufa, pois uma maior concentração desses gases na atmosfera leva a uma maior evaporação de água por conta do aumento da temperatura da superfície, o que, conseqüentemente, causa o vapor de água a não se precipitar, levando a um aumento do efeito estufa.

Para IPCC (2022, p. 230), as emissões de  $\text{CO}_2$ , provenientes de combustíveis fósseis e processos industriais, contribui em cerca de 65% para o efeito estufa. Para EPA (2023), as emissões de  $\text{CO}_2$  por queima de combustível

fóssil e processos industriais representam cerca de 79% dos gases-estufa totais, conforme a Figura 5, sendo o setor de transportes responsável por 35% das emissões nos Estados Unidos das Américas.

Segundo Denman et al. (2007, p. 46), as emissões NOx atuam diretamente na formação de ozônio troposférico, que por sua vez atua como uma força radiativa positiva para o efeito estufa. No entanto, as emissões NOx também atuam como uma força radiativa negativa no efeito estufa, forçando o tempo de vida atmosférica do metano (Denman et al., 2007, p. 46 apud Prather, 2002). Ademais, a amônia e o NOx são removidos da atmosfera por deposição no solo, afetando o ciclo do carbono ao limitar o estímulo de absorção de carbono (Denman et al, 2007, p. 29 apud Ollinger, 2002).

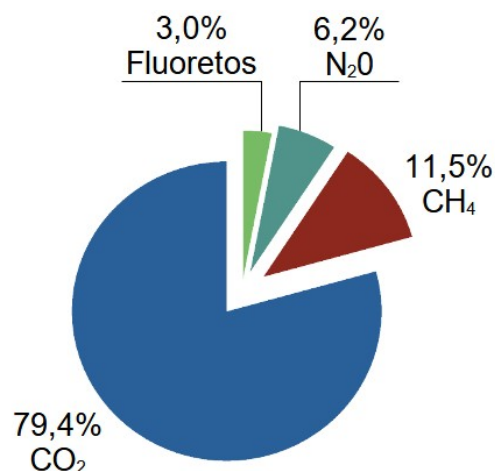
Lasek e Lajnert (2022) apontam que os gases NOx são compostos óxido nítrico (NO) e dióxido de nitrogênio (NO<sub>2</sub>), e para o potencial de aquecimento global dos gases NOx, ou global warming potential (GWP) em inglês, Lammel e Graßl (1995) apontam que o GWP varia dependendo do horizonte de tempo considerado.

Ademais, o GWP do NOx representa a “força cumulativa radiativa relativa à emissão de mesma massa do CO<sub>2</sub> (Lasek e Lajnert, 2022, tradução do autor)”. Então, em um período de 20 anos, o GWP do NOx varia entre 30 e 33 vezes do GWP, enquanto em um período de 100 anos varia entre 7 e 10 vezes (Lammel e Graßl, 1995).

Já o MP se divide em dois tipos principais, conforme CDC (2023): Material Particulado de 10nm (MP<sub>10</sub>) é mais grosseira, e é basicamente poeira, mas pode causar irritação de olhos, nariz e garganta, e o Material Particulado de 2,5nm (MP<sub>2.5</sub>) é mais fino, podendo entrar nos pulmões e na corrente sanguínea. Além disso, Turner et al. apud Brook et al. (2011, p. 1374), aponta que MP<sub>2.5</sub> é associado a um aumento na mortalidade cardiopulmonar.



Figura 5 – Divisão das emissões nos Estados Unidos da América, em 2021



Fonte: Adaptado de EPA (2023).

#### 2.4.2. Composição das emissões do diesel

Reşitoğlu, Altinişik e Keskin (2014) abordam que, em condições ideais, a queima do diesel resultaria somente em CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O, porém a queima do diesel acaba não sendo ideal. Segundo os autores, diversas razões ocasionam na queima incompleta da mistura ar e diesel, como a temperatura de combustão, a concentração ar-combustível, tempo de ignição e a turbulência na câmara de combustão.

Sendo assim, Reşitoğlu, Altinişik e Keskin (2014) apud Khair e Majewski (2006) abordam que os principais poluentes emitidos por motores a diesel são: monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>).

Já a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) subdivide as emissões de veículos a diesel em NO<sub>x</sub>, MP, CO<sub>2</sub>, apresentando o nível de emissão, em gramas por quilômetro, para diferentes tamanhos de veículos a diesel, conforme a Tabela 1. Nota-se que as emissões de CO<sub>2</sub> em g/km necessitaram de cálculo, e a metodologia utilizada para tanto está descrita na Seção 3.5.

Tabela 1 – Fator de emissão para Veículos pesados com motores do ciclo Diesel, em 2021

Ano	Fase Proconve	Categoria	NO <sub>x</sub> (g/km)	MP (g/km)	CO <sub>2</sub> (g/km)	Autonomia km/l	
2021	P7	Semileves	0,606	0,001	278,539	9,1	
		Leves	1,100	0,007	482,373	5,6	
		Caminhões	Médios	1,007	0,009	464,297	5,8
			Semipesados	1,719	0,017	758,423	3,6
			Pesados	1,571	0,012	723,564	3,6
		Ônibus	Urbanos	2,687	0,025	1318,458	2,1
			Micro-ônibus	1,526	0,007	791,329	3,3
			Rodoviários	1,439	0,015	792,712	3,4

Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

## 2.5. PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Para o cálculo das emissões de um drone, é necessário entender a matriz energética. A matriz energética do Brasil é diversa, e possui grande parte da sua capacidade de produção de energia elétrica proveniente de fontes renováveis. Segundo EPE (2023), cerca de 82% da capacidade instalada de geração de energia elétrica é renovável, a qual inclui hidroelétricas, usinas eólicas, solares.

A produção de energia elétrica por tipo e a taxa em relação ao total produzido por tipo, é observado na Tabela 2. Nota-se que a soma das taxas apresentadas na Tabela 2, resulta em 95,6% do total de 100%, e essa diferença se deve à geração de energia elétrica proveniente de outras fontes renováveis, outras fontes não renováveis, e importação de energia elétrica, sendo realizado um ajuste dos fatores em relação a esse valor, conforme a coluna Taxa ajustada da Tabela 2.

Tabela 2 – Matriz elétrica no Brasil, em 2022

Tipo de produção	Taxa sobre total	Taxa ajustada
Hidráulica	61,90%	66.49 %
Eólica	11,80%	12.67 %
Gás Natural	6,10%	6.55 %
Bagaço de cana	4,70%	5.05 %
Solar	4,40%	4.73 %
Nuclear	2,10%	2.26 %
Carvão	1,20%	1.29 %
Óleo diesel	0,90%	0.97 %
Total	93,10%	100,00%

Fonte: Adaptado de EPE (2023).

## 2.6. ESTUDOS QUE CONSIDERAM ENTREGAS COM USO DE DRONES

Nesta seção é apresentada uma breve síntese dos artigos selecionados que consideram a utilização conjunta de drones e furgões em entregas do tipo última milha.

Como os artigos são em inglês, ocorreu a tradução livre de truck (caminhão, em tradução literal) para furgão, em português, por ser o tipo de veículo mais comumente utilizado em entregas de última milha.

Em Baldisseri et al. (2022), os autores analisaram a sustentabilidade ambiental e econômica da utilização conjunta de caminhões elétricos e drones, considerando três cenários (conservador, otimista e futuro) relativos à quantidade de ciclos de cargas antes do fim de vida da bateria, ao nível de automação do drone, e aos custos selecionados.

Além disso, Baldisseri et al. (2022) determinaram que o uso do drone em entregas conjuntas pode levar a uma redução de custos de 12% a 26%, se comparado à utilização somente do caminhão. Baldisseri et al. (2022) concluem que o sistema de entregas drone-caminhão emite, em média, 351 gramas de gás carbônico equivalente ( $\text{gCO}_2\text{e}$ ) por entrega, contra 652  $\text{gCO}_2\text{e}$  por entrega de um caminhão a diesel, uma redução de 46,16%.

O modelo matemático proposto por Bányai (2022) aborda quatro cenários distintos: entregas utilizando somente furgão (cenário 1), operação primeira milha do drone (cenário 2), operação integrada primeira milha e última milha do drone (cenário 3), e operação integrada primeira milha e última milha do drone tipo milk run (cenário 4), sendo a operação milk run aquela onde o drone realiza, na mesma viagem, uma tarefa de primeira e outra de última milha.

Todas as operações com drone consideram que o drone parta e retorne ao furgão. O autor considera que o caminhão elétrico tem um consumo de 250 Wh/km, enquanto o drone tem um consumo de 30 Wh/km, conforme Bányai (2022).

Além disso, Bányai (2022) considerou que tanto o drone quanto o furgão seriam elétricos, e considerou em sua análise as emissões de poluentes causadas por diferentes fontes de energia elétrica, que são, conforme Bányai (2021): linhita, carvão, óleo, gás natural, fotovoltaica, biomassa, nuclear, água e vento. Um

descritivo quantitativo das emissões de gases do efeito estufa de cada fonte, em g/kWh, está resumida na Tabela 3.

Tabela 3 – Emissões de gases de efeito estufa para diferentes fontes de geração de energia

Fonte de geração de energia	Emissão (g/kWh)					
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM
Lignina	1054	0,032	0,88	0,48	4,76	0,04
Carvão	888	0,028	0,733	0,4	3,96	0,03
Óleo	733	0,022	0,615	0,335	3,324	0,028
Gás Natural	499	0,016	0,418	0,228	2,226	0,019
Fotovoltaico	85	0,002	0,073	0,04	0,396	0,003
Biomassa	45	0,001	0,038	0,021	0,205	0,002
Nuclear	29	<10 <sup>-3</sup>	0,024	0,013	0,132	0,001
Água	26	<10 <sup>-3</sup>	0,022	0,012	0,119	0,001
Vento	26	<10 <sup>-3</sup>	0,022	0,012	0,119	0,001

Fonte: Adaptado de Bányai (2022).

Para que fosse possível analisar essas emissões, Bányai (2022) considerou alguns parâmetros de entrada para o modelo matemático, que estão descritos a seguir:

- Latitude e longitude da tarefa de entrega;
- Peso da tarefa em quilogramas;
- Volume da tarefa em litros;
- Tipo da tarefa (última milha ou primeira milha);
- Carga máxima do drone em quilogramas;
- Carga máxima do caminhão em quilogramas;
- Energia disponível para o caminhão em kWh;
- Energia disponível para o drone em kWh;
- Consumo energético específico do caminhão em kWh/km;
- Consumo energético específico do drone em kWh/km;
- Emissão específica de gases do efeito estufa dependendo da fonte de energia elétrica em g/kWh;
- Fonte de geração de energia elétrica utilizada.

Com esses parâmetros, Bányai (2022) elaborou uma Função Objetivo (FO) para cada cenário, e cada uma dessas funções busca minimizar o consumo energético total para a menor rota possível dentro dos pontos de entrega considerados. Para um dos cenários em estudo, o objetivo é minimizar a soma do custo energético de saída e retorno ao depósito da rota e do custo energético de toda a rota realizada pelo furgão, descrito na Equação (1).

$$C^1 = C^{1TD} \rightarrow + C^{1TR} + C^{1T} \rightarrow D \rightarrow \min \quad (1)$$

Bányai (2022) apresenta uma FO similar para o segundo cenário considerado no estudo, porém são incorporados, ainda, o custo energético de retorno do drone ao depósito do último ponto de coleta, além do custo energético do drone para realizar todas as rotas entre os pontos de coleta e o furgão, descrito na Equação (2).

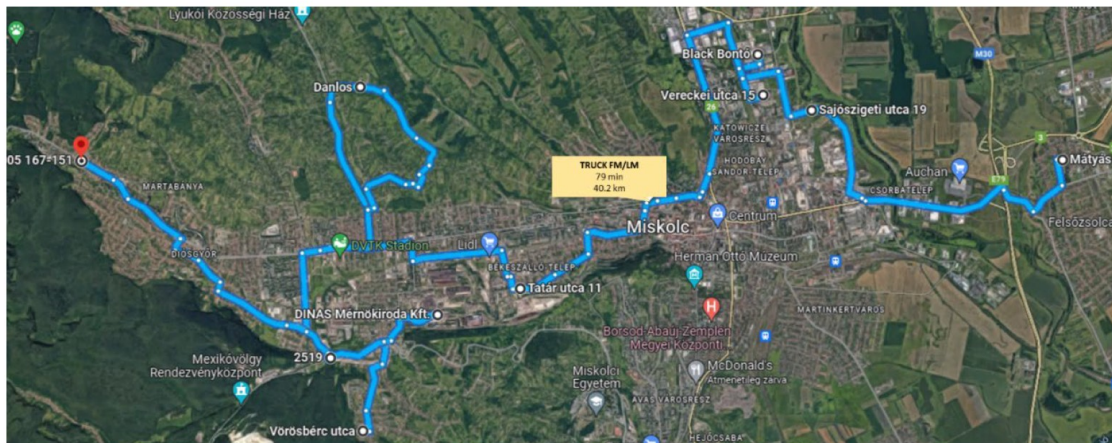
$$C^2 = C^{2TD} \rightarrow + C^{2TR} + C^{2T} \rightarrow D + C^{2DR} + C^{2D} \rightarrow D \rightarrow \min \quad (2)$$

Os autores consideraram ainda o estudo de um terceiro cenário, o qual incorpora o cálculo do custo energético de saída do drone do depósito até o primeiro ponto de coleta da rota, conforme Bányai (2022). Já o quarto cenário consiste no drone realizar uma operação do tipo milk run, que consiste em entregar um pacote em um ponto, coletar outro pacote em um segundo ponto e retornar ao caminhão. A FO dos cenários 3 e 4 está descrita pela Equação (3).

$$C^3 = C^{3TD} \rightarrow + C^{3TR} + C^{3T} \rightarrow D + C^{3DD} \rightarrow + C^{3DR} + C^{3D} \rightarrow D \rightarrow \min \quad (3)$$

As rotas somente caminhão, ou cenário 1, e com utilização do caminhão e drone, ou cenário 3, estão expostas na Figura 6 e na Figura 7, respectivamente. Para o cenário 1, o caminhão levou 79 minutos e percorreu 40,2 km, conforme a Figura 6, enquanto no cenário 3 o caminhão levou 38 minutos para percorrer 21,6 km, e o drone levou 27 minutos e 43 segundos para percorrer 13,68 km, conforme a Figura 7.

Figura 6 – Caminho realizado pelo caminhão no cenário 1



Fonte: Bányai (2022).

Figura 7 – Caminhos realizados pelo caminhão e drone no cenário 3



Fonte: Bányai (2022).

## 2.7 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS

Nesta seção, são apresentados modelos matemáticos de otimização para sistemas de entrega com uso combinado de furgões e drones (problema do caixeiro viajante com drones (PCV-D), com uso somente de furgões (problema do caixeiro viajante PCV), e o sistema de entrega somente com drone (ESD).

Em geral, esses modelos são propostos para minimizar a distância total percorrida, ou o tempo total de viagem, como o modelo de Miller, Tucker e Zemlin (1960).

### 2.7.1 Modelo PCV-D

Agatz, Bouman e Schmidt (2015) descreveram uma modelagem para solucionar o problema de entregas utilizando furgões e drones, ou PCV-D. Segundo os autores, o objetivo do PCV-D é encontrar a rota de menor tempo para servir todos os clientes por drone ou furgão, onde duas premissas fundamentais são assumidas:

- O drone tem capacidade de uma unidade e deve retornar ao furgão a cada entrega para pegar um outro pacote; e
- A coleta dos pacotes só pode ocorrer na localização do cliente. Ou seja, o drone só pode pousar e levantar voo do furgão parado na localização do cliente ou no depósito (AGATZ, BOUMAN, SCHMIDT, 2015).

Além disso, Agatz, Bouman e Schmidt (2015) assumiram que o drone utiliza a mesma rede de vias que o furgão, por questões de segurança e privacidade que restringem o espaço aéreo pelo qual o drone voa. Os autores assumiram que o drone é mais rápido que o furgão por um fator  $\alpha$ , e que a distância máxima que o drone pode cobrir é  $d^{max}$ , resultando em um tempo máximo de  $t^{max}$ , por conta da vida útil limitada da bateria, e as atividades do drone de recarga da bateria, coleta e entrega de pacotes são realizadas instantaneamente, ou seja, são desconsideradas.

Agatz, Bouman e Schmidt (2015) apontam que na solução proposta existem duas rotas, a rota do furgão  $R=(r_0=v_0, r_1, \dots, r_n=v_0)$ , onde  $v_0$  é o depósito, em conjunto com uma rota do drone  $D=(d_0=v_0, d_1, \dots, d_m=v_0)$ , também havendo a distinção entre os tipos de nós:

- Nó drone, nó visitado somente pelo drone;
- Nó furgão, nó visitado somente pelo furgão; e
- Nó combinado, nó visitado por ambos o furgão e o drone.

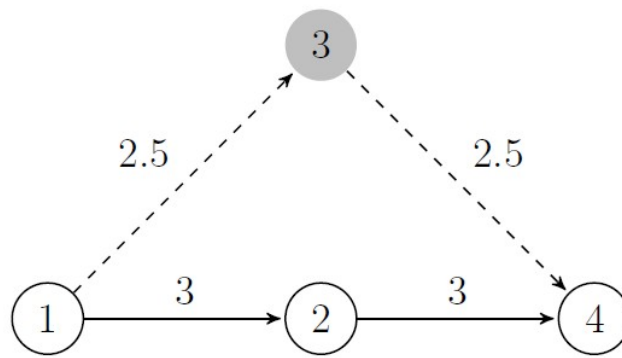
Além disso, como não há a necessidade de sincronização entre os dois veículos, um deles pode esperar pelo outro em um nó combinado. Para esse processo, Agatz, Bouman e Schmidt (2015) definiram o conceito de operação, onde uma operação  $k$  consiste de um nó de início e um nó de fim. Em uma operação, o drone parte do furgão do nó de início, realiza a entrega no nó drone e retorna ao



furgão no nó de fim, e o furgão pode ir diretamente do nó de início ao nó de fim, ou pode visitar qualquer número de nós furgão, ou pode esperar no nó de início para que o drone retorne, onde o nó de início é igual ao nó de fim.

Uma operação com 4 nós é descrita na Figura 8, onde os nó 1 e 4 são nós combinados, o nó 2 é nó furgão e o nó 3 é nó drone. Nesse exemplo, a rota do drone tem custo 5 unidades de tempo, e a rota do furgão tem custo 6 unidades de tempo, logo, o drone espera o furgão no nó 4 por 1 unidade de tempo.

Figura 8 – Exemplo de operação



Fonte: Agatz, Bouman e Schmidt (2015)

O modelo matemático é descrito por Agatz, Bouman e Schmidt (2015) por meio uma FO, descrita pela Equação (4), e pelas restrições das Equações (5) a (18). Os autores tratam de sete equações adicionais para melhorar o resultado, porém essas não serão tratadas neste trabalho, conforme abordado na Seção 3.4. Para esse modelo, foram considerados os seguintes parâmetros e variáveis, conforme Agatz, Bouman e Schmidt (2015):

- $t(k)$ : tempo de execução das rotas do furgão e do drone, na operação  $k$ ;
- $y(v, k)$ : variável binária que determina se o nó  $v$  é o nó drone da operação  $k$ ;
- $x(v, k, i)$ : variável binária que determina se o nó  $v$  é visitado na posição  $i$  dentro da operação  $k$ , onde  $x(v, k, 0)$  e  $x(v, k, NT+1)$  representam os nós de início e fim da operação  $k$ ;
- $l(v, w, k)$ : tempo de condução do furgão de  $v$  até  $w$ , caso o furgão realize esse caminho dentro da operação  $k$ . Se não realiza, o valor é 0; e



- $d(v, w, k)$ : tempo de voo do drone de  $v$  até  $w$ , caso o drone realize esse caminho dentro da operação  $k$ . Se não realiza, o valor é 0.

Além disso, essas variáveis estão em função de constantes ou variáveis independentes. Agatz, Bouman e Schmidt (2015) descrevem-nas como:

- $v$ : variável inteira que representa um nó de origem ou um nó qualquer que é analisado;
- $w$ : variável inteira que representa um nó de destino;
- $k$ : uma operação dentro da viagem do conjunto drone e furgão, que contém informações das rotas tanto do drone quanto do furgão. Variável independente com valor do tipo inteiro;
- $i$ : posição em que o nó  $v$  é visitado na rota do furgão, dentro da operação  $k$ . Variável independente com valor do tipo inteiro;
- $t^{max}$ : tempo máximo de voo do drone. Constante com valor do tipo inteiro.
- $c(v, w)$ : matriz de tempos necessários para ir do nó  $v$  ao nó  $w$ . Constante com valores do tipo double;
- $N$ : Número total de nós. Constante com valor do tipo inteiro;
- $N_T$ : Número suficientemente grande de nós furgão  $i$ . Constante com valor do tipo inteiro; e
- $N_{OP}$ : Número limite superior de operações  $k$  contidas em uma solução ótima. Constante com valor do tipo inteiro.

Além disso, Agatz, Bouman e Schmidt (2015) denotaram uma relação entre  $N$ ,  $N_T$  e  $N_{OP}$ , onde  $N_T = N$  e  $N_{OP} = N + 1$ . Os autores notam que, para um caso real,  $N_T$  é muito menor que  $N$ , e que  $N_{OP}$  não excede metade de  $N$ , porém nesse trabalho, para fins de simplificação, será utilizada a relação  $N_{OP} = N_T = N/2$ .

Então, dadas essas informações, é possível descrever a FO e as restrições, por meio das Equações (4) a (18), conforme Agatz, Bouman e Schmidt (2015). Assim, uma solução com as restrições das Equações (5) a (18) tem  $N_{OP}$  operações, que por sua vez contém somente um nó drone e diversos nós caminhões  $N_T$ .

$$\text{Min} \sum_{k=1}^{N_{OP}} t(k) \quad (4)$$

A Equação (4) descreve a FO de minimização da soma de cada operação.

$$\sum_{k=1}^{N_{OP}} y(v, k) + \sum_{i=0}^{N_T+1} x(v, k, i) \geq 1 \quad \forall v \in V \setminus \{v_0\} \quad (5)$$

A restrição da Equação (5) garante que cada nó possua uma função (nó furgão, nó drone ou nó combinado). Ou seja, garante que cada nó seja visitado ao menos uma vez.

$$x(v_0, 1, 0) = 1 \quad (6)$$

$$x(v_0, N_{OP}, N_T+1) = 1 \quad (7)$$

A restrição da Equação (6) faz com que a primeira operação comece no depósito  $v_0$ . Já a restrição da Equação (7) garante com que a última operação termine no depósito  $v_0$ .

$$x(v, k, N_T+1) = x(v, k+1, 0) \quad \forall k=1, \dots, N_{OP}-1, v \in V \quad (8)$$

A restrição da Equação (8) garante que o nó final de uma operação seja o nó inicial da operação subsequente.

$$\sum_{v \in V} y(v, k) \leq 1 \quad \forall k=1, \dots, N_{OP} \quad (9)$$

A restrição da Equação (9) garante que cada operação tenha no máximo um nó drone.

$$\sum_{v \in V} x(v, k, i) = 1 \quad \forall k=1, \dots, N_{OP}, \forall i=0, \dots, N_T+1 \quad (10)$$

A restrição da Equação (10) garante que, durante a operação  $k$ , cada posição  $i$  na sub-rota do furgão seja preenchida, podendo ser preenchida com o mesmo nó em diversas posições  $i$ .

$$d(v, w, k) \geq \alpha \cdot c(v, w) \cdot (x(v, k, 0) + y(w, k) - 1) \quad \forall v \in V, w \in V, k = 1, \dots, N_{OP} \quad (11)$$

$$d(v, w, k) \geq \alpha \cdot c(v, w) \cdot (x(v, k, N_T + 1) + y(v, k) - 1) \quad \forall v \in V, w \in V, k = 1, \dots, N_{OP} \quad (12)$$

As restrições das Equações (11) e (12) restringe o tempo de voo do drone por meio da variável  $d(v, w, k)$ , onde o custo do drone será igual ou maior que o custo  $c(v, w)$  em uma operação  $k$ , partindo de um nó  $v$  até um nó  $w$ , multiplicado por um coeficiente  $\alpha$  se, e somente se, o furgão está no nó  $v$  na posição 0, conforme a Equação (11), e que o furgão esteja no nó  $v$  na posição  $N_T + 1$ , conforme a Equação (12).

$$t(k) \geq \sum_{v \in V, w \in V} d(v, w, k) \quad \forall k = 1, \dots, N_{OP} \quad (13)$$

A restrição da Equação (13), assim como as Equações (11) e (12), garantem que a duração de uma operação seja igual a, no mínimo, o tempo de voo do drone na operação.

$$\sum_{v \in V, w \in V} d(v, w, k) \leq t^{max} \quad \forall k = 1, \dots, N_{OP} \quad (14)$$

A restrição da Equação (14) limita o tempo de voo do drone na operação  $k$  a, no máximo, o tempo permissível de voo do drone.

$$l(v, w, k) \geq c_{vw} \cdot (x(v, k, i) + x(w, k, i+1) - 1) \quad \forall v \in V, w \in V, k = 1, \dots, N_{OP}, i = 0, \dots, N_T \quad (15)$$

$$t(k) \geq \sum_{v \in V, w \in V} l(v, w, k) \quad \forall k = 1, \dots, N_{OP} \quad (16)$$

A Equação (15) restringe o tempo de condução do furgão entre os nós  $v$  e  $w$ , onde  $l(v, w, k)$  será esse tempo somente se  $v$  for o  $i$ -ésimo nó furgão e  $w$  o  $i$ -ésimo +

1 nó furgão na operação  $k$ . Já a Equação (16) restringe a duração da operação  $k$  para, no mínimo, o tempo de condução do caminhão na operação  $k$ .

$$y(v, k), x(v, k, i) \in \mathbb{Z}\{0, 1\} \quad \forall v \in V, k=1, \dots, N_{OP}, i=0, \dots, N_T+1 \quad (17)$$

$$d(v, w, k), l(v, w, k) \geq 0 \quad \forall v, w \in V, k=1, \dots, N_{OP} \quad (18)$$

As Equações (17) e (18) restringem o domínio de definição das variáveis, onde  $y(v, k)$  e  $x(v, k, i)$  podem assumir somente os valores 1 ou 0 na Equação (17), e as variáveis  $d(v, w, k)$  e  $l(v, w, k)$  são definidas como não-negativas na Equação (18).

### 2.7.2 Modelo PCV

O modelo de roteirização com apenas uso de furgões, é conhecido como Problema do caixeiro viajante (PCV).

A forma clássica do PCV pode ser representada por um grafo  $G(V, F)$ , em que  $V = \{1, \dots, n\}$  representa um conjunto de  $n$  cidades, e  $A$  representa o conjunto de arestas entre as cidades. Supondo  $G$  um grafo completo, ou seja, para todo par de cidades  $i$  e  $j$ ,  $i \neq j$  em  $V$  existe uma aresta  $(i, j)$  e que a distância entre a cidade  $i$  e a cidade  $j$  é denotada por  $d_{ij}$ . Quando  $d_{ij} = d_{ji}$ , diz-se que o grafo é simétrico (Christofides, 1975).

O objetivo é atingir um caminho hamiltoniano de custo mínimo, ou seja, um circuito que passe por todos os nós apenas uma vez com o menor custo possível (Goldberg, Luna, 2005). Define-se, então, a variável  $x_{ij}$ , onde  $i, j \in V$ , e  $x_{ij} = 1$  se a viagem da cidade  $i$  à cidade  $j$  ocorre, ou  $x_{ij} = 0$ .

Miller, Tucker e Zemlin (1960) solucionam matematicamente o PCV com as Equações (19) a (24), descritas a seguir. Vale notar que a FO e as restrições tiveram seus valores deslocado em 1, ou seja, iniciam em 1 em vez de 0.

$$\text{Min} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (19)$$

A Equação (19) é a FO do modelo, que consiste em minimizar a soma dos custos da rede, multiplicando-se o custo  $c_{ij}$  de um arco com origem no nó  $i$  e destino no nó  $j$ , por um binário  $x_{ij}$ .

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j=2, \dots, n, i \neq j \quad (20)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i=2, \dots, n, i \neq j \quad (21)$$

As Equações (20) e (21) restringem a FO, ao definir que cada nó pode ter apenas um arco saindo e entrando no mesmo.

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq V, 2 \leq |S| \leq n-2 \quad (22)$$

A Equação (22) faz com que não se formem sub-rotas, onde  $|S|$  representa a cardinalidade do subconjunto  $S$ .

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, i \neq j \quad (23)$$

A Equação (23) restringe a variável  $x_{ij}$  para que essa seja binária.

$$u_i - u_j + (n-1)x_{ij} \leq n-2 \quad i=2, \dots, n, j=2, \dots, n, i \neq j \quad (24)$$

$$u_i \geq 0 \quad i=2, \dots, n \quad (25)$$

A Equação (24) restringe a variável  $x_{ij}$ , garantindo que a solução não possua sub-rotas em um conjunto de vértices  $S \subseteq V$ , enquanto a Equação (25) garante que cada valor de  $u_i$  seja único, conforme Desrochers e Laporte (1991).

Para demonstrar a Equação (24), Desrochers e Laporte (1991) consideram uma sub-rota com um número  $k$  de nós visitados, onde  $k < n$ , e consideram a soma das restrições aplicadas da Equação (23), resultando em  $k(n-1) \leq k(n-2)$ , o que é uma contradição e, portanto, não permitindo a existências de sub-rotas.

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (26)$$

A equação (26) é uma condição para que a variável de decisão  $x_{ij}$  permaneça entre 0 e 1, ou seja, garante que  $x_{ij}$  seja um binário, conforme Desrochers e Laporte (1991). As equações (19) a (21), (24) a (26) constituem o modelo de Programação Linear Inteira (PLI) para o PCV somente com caminhões (ou qualquer outro veículo), sendo que o código está disponível nos apêndices F, G, H e I.

### 2.7.3 Modelo ESD

Para o problema do drone, nota-se que o drone pode realizar somente uma entrega de cada vez, e sempre deve retornar ao depósito para pegar um novo pacote, assim como no modelo de Agatz, Bouman e Schmidt (2015).

Para fins de simplificação, considera-se que os nós são atendidos em sequência, iniciando no nó 1, e finalizando no nó  $n$ .

$$C(d) = \sum_{v=1}^N \frac{2}{\alpha} d(v_0, v) \quad (27)$$

A Equação (27) realiza um somatório do tempo de deslocamento  $d(v_0, v)$  para sair de  $v_0$ , no caso, o nó 1, e ir até um nó  $v$ , sendo então esse esse tempo o mesmo do furgão, e que é convertido para o tempo do drone por um fator  $1/\alpha$ . Para o grafo de exemplo com 9 nós, conforme as tabelas de custos do furgão dos Apêndices I e J, e considerando  $\alpha=2$ , a solução da Equação (27) resulta em um tempo de 12 minutos.

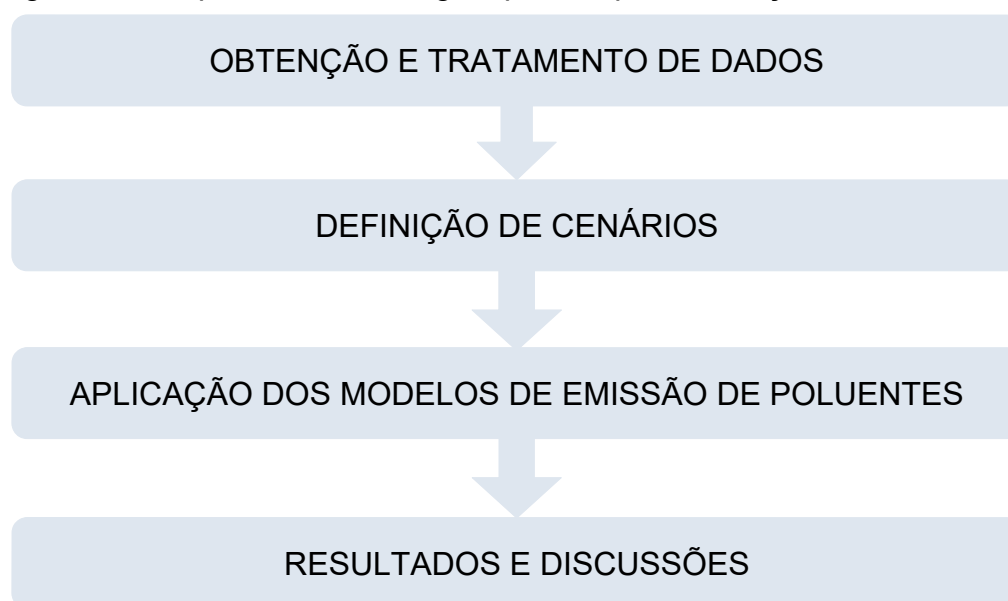
### 3. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentadas as etapas da metodologia considerada na condução deste trabalho. Ademais, definem-se as etapas necessárias para obter os resultados de tempo de trajeto e resultados de emissão de poluentes, para diferentes cenários, por meio do fluxograma da Figura 9.

Na etapa de definição e obtenção dos dados, são coletadas as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo matemático e para cálculo dos fatores de emissão de poluentes. Na etapa de definição de cenários, são criados três cenários para análise: o cenário base, que envolve somente a utilização do furgão, o cenário com drones e furgões, e o cenário somente drone.

A próxima etapa é a definição dos modelos de emissão de poluentes, onde são definidos os fatores de emissão de poluentes necessários para se comparar os três cenários definidos na etapa anterior, além da realização de conversões numéricas dos fatores de emissão para g/km. Por fim, na última etapa são obtidos os resultados em tempo de trajeto e emissão de poluentes, além da realização de discussões dos resultados obtidos.

Figura 9 – Etapas da metodologia aplicada para obtenção dos resultados



Fonte: Autoria própria.

### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A preocupação com o problema do caixeiro viajante em entregas em última milha tem aumentado nos últimos anos, principalmente no que tange à emissão de poluentes, conforme abordado nos capítulos 2.2 e 2.4. Com isso, surge a possibilidade da entrega conjunta utilizando caminhões e drones, ou PCV-D, como abordado por Agatz, Bouman e Schmidt (2015) nesse trabalho, porém os autores não analisam a emissão de poluentes.

Nota-se que os trabalhos estudados em língua inglesa não discernem sobre o tipo de caminhão, porém neste trabalho o termo caminhão é generalizado como furgão. De acordo com CETESB (2022), um caminhão semileve tem um peso bruto total (PBT) entre 3,8 toneladas e 6 toneladas e, um furgão Mercedes-Benz Sprinter, por exemplo, tem um PBT máximo de 5.000kg (Mercedes-Benz, 2023), ou 5 toneladas, portanto, podendo ser classificado com um caminhão semileve.

Assim, a análise ambiental do problema é melhor definida ao se realizar uma revisão bibliográfica de trabalhos anteriores, que abordem a emissão de poluentes em entregas de última milha do PCV-D, seguindo os passos do capítulo 3.2 para tanto. Feito isso, é possível definir os indicadores de emissão de poluentes, conforme o capítulo 2.4.2. Com os indicadores de emissão de poluentes definidos, faz-se necessário comparar esses indicadores em diferentes cenários.

O cenário base é o método tradicional, onde o furgão percorrerá um caminho mínimo, dado um certo conjunto de pontos de entrega. O segundo cenário implica que o drone possa realizar a entrega em todos os nós por conta própria. Por fim, no terceiro cenário são analisadas as distâncias percorridas pelo drone e pelo caminhão. No Capítulo 4, apresenta-se a análise da diferença de distâncias e tempo para percorrer todos os nós, assim como a análise da diferença na emissão de poluentes para os três cenários.

### 3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Aplicou-se a metodologia PRISMA para a revisão de literatura sobre o tema em estudo, seguindo o checklist presente no Apêndice B. O item 1 do Apêndice B é



atendido com o título desse trabalho, e o item 2 é atendido pelo sumário deste trabalho.

No item 5 do Apêndice B, consideram-se os critérios de inclusão sendo: presença da análise de entregas conjuntas com drones e caminhões/furgões, presença da análise do impacto ambiental de emissões de gases do efeito estufa (qualquer gás entre os descritos na seção 2 é considerado) e presença da análise de diferentes cenários de entregas de última milha. Já os critérios de exclusão são: apresentação confusa de resultados da análise e análise de entregas de última milha para um único modo de transporte.

Para tanto, atendendo aos itens 3 e 4 do Apêndice B, selecionaram-se algumas palavras-chave, em língua inglesa, para se pesquisar nas bases de dado, seguindo os objetivos gerais e específicos propostos nas seções 1.1.1 e 1.1.2. As palavras-chave utilizadas foram: drone, truck, sustainability e last mile.

Também foram definidos os bancos de dados a serem utilizados para a pesquisa, conforme o item 6 do Apêndice B. No caso deste trabalho, somente a base de dados da CAPES foi utilizada, por conta da quantidade de bases de dados inseridas no sistema. De acordo com CAPES (2023), são 396 bases de dados ao todo, e 39 mil periódicos com texto completo. Ao todo, a pesquisa resultou em 9 trabalhos acadêmicos, antes da triagem de resumo, seguindo o item 7 do Apêndice B.

Após, foi realizada a triagem de resumo, conforme o item 2 do Apêndice B, que segue os critérios impostos para o item 5. No Fluxograma, é indicado no primeiro processo da seção de triagem, conforme o Apêndice A. No caso, foram excluídos 3 relatórios.

Para o item 8 do Apêndice B, os 6 artigos remanescentes foram recuperados e avaliados em sua totalidade, onde 4 artigos foram removidos, ainda conforme o item 8 do Apêndice B. Um artigo foi removido por ter uma apresentação confusa e incerta de dados, e três artigos foram removidos por não incluir a análise conjunta com drones e caminhões. Portanto, 2 artigos foram considerados para a base de estudo deste trabalho, que são, a saber, os trabalhos de Baldisseri et al. (2022) e Bányai (2022).

### 3.3 MODELOS DE OTIMIZAÇÃO PARA PROPOSIÇÃO DE CENÁRIOS

#### 3.3.1 Metodologia de resolução com Modelos alterados

Escolheu-se o modelo de Agatz, Bouman e Schmidt (2015) para o PCV-D, o modelo de Miller, Tucker e Zemlin (1960) para o PCV somente com furgão, e o modelo de entregas somente com drones foi proposto pelo autor, por ser apenas um somatório simples do tempo de viagem (ida e volta) do depósito até cada nó.

Os modelos PCV e PCV-D necessitaram de algumas alterações para adequar à aplicação da linguagem AMPL, a qual foi escolhida por ter implementação mais direta e por se encaixar às necessidades do trabalho. O AMPL serve como uma linguagem de modelagem para programação matemática, comunicando modelos de otimização para um sistema computacional (AMPL, 2023).

Para o modelo PCV de Miller, Tucker e Zemlin (1960), ocorreu a troca das Equações (22) e (23) pelas Equações (24) e (25) consideradas em Desrochers e Laporte (1991), por sua maior simplicidade de entendimento e execução, sem prejudicar o correto funcionamento do modelo, enquanto as equações (20), (21), (22) e (25) permaneceram inalteradas.

Já o modelo PCV-D de Agatz, Bouman e Schmidt (2015) necessitou ajuste em todas as equações, por conta das restrições estarem fora do padrão utilizado em AMPL, exigindo que as equações tivessem seus valores deslocados.

$$\text{Min} \sum_{k=2}^{N_{OP}+1} t(k) \quad (26)$$

$$\sum_{k=2}^{N_{OP}+1} y(v,k) + \sum_{i=1}^{N_T+2} x(v,k,i) \geq 1 \quad \forall v \in V \setminus \{v_0\} \quad (27)$$

$$x(1,2,1)=1 \quad (28)$$

$$x(1, N_{OP}+1, N_T+2)=1 \quad (29)$$

$$x(v,k, N_T+2)=x(v,k+1,1) \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}, v \in V \quad (30)$$

$$\sum_{v \in V} y(v,k) \leq 1 \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (31)$$

$$\sum_{v \in V} x(v,k,i)=1 \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}+1, \forall i=1, \dots, N_T+2 \quad (32)$$

$$d(v,w,k) \geq \left(\frac{1}{\alpha}\right) \cdot c(v,w) \cdot (x(v,k,1)+y(w,k)-1) \quad \forall v \in V, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (33)$$

$$d(v, w, k) \geq \left(\frac{1}{\alpha}\right) \cdot c(v, w) \cdot (x(v, k, N_T+2) + y(v, k) - 1) \quad \forall v \in V, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (34)$$

$$t(k) \geq \sum_{v \in V, w \in V} d(v, w, k) \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (35)$$

$$\sum_{v \in V, w \in V} d(v, w, k) \leq t^{\max} \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (36)$$

$$l(v, w, k) \geq c_{vw} \cdot (x(v, k, i) + x(w, k, i+1) - 1) \quad \forall v \in V, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1, i=1, \dots, N_T+1, v \neq w \quad (37)$$

$$t(k) \geq \sum_{v \in V, w \in V} l(v, w, k) \quad \forall k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (38)$$

$$y(v, k), x(v, k, i) \in z\{0, 1\} \quad k=2, \dots, N_{OP}+1, i=1, \dots, N_T+2 \quad (39)$$

$$d(v, w, k), l(v, w, k) \geq 0 \quad \forall v, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1 \quad (40)$$

A Equação (4) é substituída pela Equação (26), onde  $k$  passa a variar de 2 a  $N_{OP}+1$  no somatório. A Equação (5) é substituída pela Equação (27), onde  $k$  passa a variar de 2 a  $N_{OP}+1$  e  $i$  passa a variar de 1 a  $N_T+1$  nos somatórios.

Nas Equações (6) e (7), a expressão  $x(v_0, 1, 0)=1$  é substituída por  $x(1, 2, 1)$ , por conta do nó depósito ser representado pelo primeiro valor de  $v$  e  $w$  na matriz  $c_{vw}$ ,  $k$  iniciar em 2 e  $i$  iniciar em 1, na variável  $x(v, k, i)$ , na solução do AMPL, enquanto as outras variáveis tiveram seus valores somados em 1. As Equações (6) e (7) são substituídas por (28) e (29), respectivamente.

A Equação (8) é substituída pela equação (30), onde a expressão  $x(v, k, N_T+1)$  é substituída por  $x(v, k+1, N_T+2)$  e a expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}-1$  é substituída por  $\forall k=2, \dots, N_{OP}$ . A Equação (9) é substituída pela Equação (31), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}$  por  $\forall k=2, \dots, N_{OP}+1$ . A Equação (10) é substituída pela Equação (32), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}, \forall i=0, \dots, N_T+1$  por  $\forall k=2, \dots, N_{OP}+1, \forall i=1, \dots, N_T+2$ .

As Equações (11) e (12) são substituídas pelas equações (33) e (34), respectivamente, ocorrendo a substituição da expressão  $x(v, k, 0)$  por  $x(v, k, 1)$  na Equação (33), e a substituição da expressão  $x(v, k, N_T+1)$  por  $x(v, k, N_T+2)$  na Equação (34), e a substituição da expressão  $\alpha$  por  $1/\alpha$ . Em ambas as equações, a expressão  $\forall v \in V, w \in V, k=1, \dots, N_{OP}$  é substituída por  $\forall v \in V, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1$ .

A Equação (13) é substituída pela equação (35), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}$  por  $\forall k=2, \dots, N_{OP}+1$ . A Equação (14) é substituída pela equação (36), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}$  na Equação (14) pela expressão  $\forall k=2, \dots, N_{OP}+1$ .

A Equação (15) é substituída pela equação (37), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall v \in V, w \in V, k=1, \dots, N_{OP}, i=0, \dots, N_T$  pela expressão  $\forall v \in V, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1, i=1, \dots, N_T+1, v \neq w$ . Nota-se que foi necessária a adição da sub-restrição  $v \neq w$ , fazendo com que não ocorra a soma do custo de deslocamento caso o furgão permaneça no mesmo nó em duas posições subsequentes. A adição dessa sub-restrição será tratada novamente na seção 4.1.

A Equação (16) é substituída pela Equação (38), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall k=1, \dots, N_{OP}$  por  $\forall k=2, \dots, N_{OP}+1$ . A Equação (17) é substituída pela Equação (39), ocorrendo a substituição da expressão  $k=1, \dots, N_{OP}, i=0, \dots, N_T+1$  por  $k=2, \dots, N_{OP}+1, i=1, \dots, N_T+2$ . A Equação (18) é substituída pela Equação (40), ocorrendo a substituição da expressão  $\forall v, w \in V, k=1, \dots, N_{OP}$  por  $\forall v, w \in V, k=2, \dots, N_{OP}+1$ .

Em relação aos modelos de PCV somente furgão e ESD, não houve necessidade de ajuste para o AMPL e GUROBI. Logo, foi possível transcrevê-los em AMPL sem substituições nas equações propostas.

### 3.3.2 Modelagem do sistema ESD

O drone considerado para a modelagem é do tipo multi-rotor, por ser o mais amplamente utilizado em entregas de última milha, conforme abordado na Seção 2.3.2. Além disso, utilizam-se os dados do drone DLV-2 da Speedbird (2023), apresentado também na Seção 2.3.2, o qual possui uma autonomia igual a 16km, ou 16 minutos, considerando que o drone voe a uma velocidade constante de 60 km/h.

Além disso, possui uma capacidade de carga igual a 6kg, porém, por motivos de simplificação, os cálculos envolvendo a carga serão desconsiderados. Logo, conforme apresentado na Seção 2.6, o drone possui um consumo de energia elétrica igual a 30 Wh/km.

### 3.3.3 Resolução dos Modelos utilizando AMPL e Gurobi

Com as Equações (26) a (40) apresentadas na Seção 3.3, foi possível transcrever as expressões em AMPL. Para tanto, três arquivos foram criados, “data\_modif.dat”, “model\_modif.mod”, “commands\_modif.run” e “data\_modif2.dat”, os quais podem ser visualizados, respectivamente, nos Apêndices C, D, E e I.

Os arquivos “data\_modif.dat” e “data\_modif2.dat” contêm todos os parâmetros necessários para a execução do modelo, respectivamente para 4 nós e 9 nós, incluindo a matriz de distâncias  $c_{vw}$ , conforme as linhas 9 a 14 do Apêndice D e linhas 9 a 19 do Apêndice I. A fim de proibir que a rota visite o nó atual, utiliza-se um valor muito grande, no caso 9999.9. Ainda, seguiu-se com a métrica estabelecida na Seção 2.6 para os valores  $N_{Op}$  e  $N_T$ , conforme as linhas 2 e 3 dos Apêndices D e I.

No arquivo “model\_modif.mod” são representadas todas as restrições e a FO, com os devidos ajustes, conforme apresentado nas Equações (26) a (40). A Equação (17) foi subdividida em duas, como descrito nas linhas 14 e 15 do Apêndice C, representando os binários  $x(v, k, i)$  e  $y(v, k)$ , respectivamente. O mesmo se fez com a Equação (18), que foi subdividida em duas, como descrito nas linhas 11 e 12 do Apêndice C, representando o tempo de percurso do drone  $d(v, w, k)$  e o tempo de percurso do furgão  $l(v, w, k)$  pelo arco  $v, w$ , caso esse arco seja percorrido na operação  $k$ .

Já o arquivo “commands\_modif.run” contém as instruções para que o solver GUROBI solucione o modelo desenvolvido nos arquivos “model\_modif.mod” e “data\_modif.dat”. O objetivo é solucionar o problema, logo, encontrar a FO, e apresentar os valores de  $x$  e  $y$ , que representam as rotas do furgão e do drone, respectivamente, e o tempo  $t$  de cada operação.

O modelo PCV somente furgão também segue o mesmo princípio de resolução do modelo PCV-D, porém sem necessidade de ajustes, utilizando-se as fórmulas apresentadas na Seção 2.6.2. Então, três arquivos foram criados, “data\_truck.dat”, “model\_truck.mod” e “commands\_truck.run”, os quais podem ser visualizados, respectivamente, nos Apêndices F, G e H.

O arquivo “data\_truck.dat” contém o parâmetro  $n$  para número de nós, e  $c$  sendo a matriz dos tempos de deslocamento do furgão. O arquivo

“model\_truck.mod” contém as restrições e a FO, além da variável auxiliar  $u$ , utilizada nas restrições das Equações (23) e (24), e a variável  $x$ , que representa o caminho percorrido pelo furgão. Por fim, o arquivo “comandos\_truck.run” contém as instruções para executar o modelo, e apresentar os resultados da FO e do caminho  $x$ .

Nota-se, ainda, que os valores dos custos presentes nos arquivos “model\_modif.dat” e “data\_truck.dat” são valores de tempo em minutos, os quais devem ser convertidos para quilômetros na análise final. Conforme abordado nas seções anteriores, adota-se a velocidade do drone como sendo o dobro da velocidade do furgão, logo, 30 km/h para o furgão e 60 km/h para o drone.

### 3.4 MODELOS DE ANÁLISE DE EMISSÃO POR CENÁRIOS

A metodologia para analisar a emissão de poluentes consiste no cálculo da emissão de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e MP a partir dos resultados obtidos da aplicação dos modelos PCV-D, PCV somente furgão e ESD.

Para o cálculo das emissões do furgão, utilizam-se os fatores dos dados de poluição da CETESB (2022) para caminhões semileves, conforme descrito na Seção 2.4.2, os quais são multiplicados pela distância percorrida pelo furgão em cada modelo.

No entanto, é necessário encontrar as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em g/km, informação que não estava prontamente disponível em CETESB (2022), e para tanto se utilizou do valor de emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em g/kWh, o consumo de diesel em g/kWh e a autonomia em km/l, conforme CETESB (2022), e considerou-se a densidade do diesel como sendo uma média ponderada dos valores máximos e mínimo do diesel S10, resultando em 842,5 g/L (SILVA et al., 2017).

Assim, divide-se a densidade do diesel pelo consumo em g/kWh, e divide-se esse valor pela autonomia em km/l. Com esse valor resultante, em kWh/km, é possível calcular a emissão de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em g/km, multiplicando-se as emissões de CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub> em g/kWh pelo fator encontrado. Com isso, é possível encontrar as emissões de poluentes para cada modelo. A Equação (41) resume o cálculo realizado para tanto.

$$Emissão\ furg\tilde{a}o\ [g/km] = Emiss\tilde{o}es\ [g/kWh] \cdot \frac{Densidade\ [g/L]}{Autonomia\ [km/L] \cdot Consumo\ [g/kWh]} \quad (41)$$

Já para o cálculo das emissões do drone, considera-se somente as emissões relativas ao consumo de energia elétrica do drone. Para tanto, utilizam-se os dados da matriz elétrica atualmente no Brasil, conforme apresentado na Tabela 2 na Seção 2.5, os fatores de emissão para cada fonte de poluente, conforme apresentado na Tabela 3 na Seção 2.6, o consumo energético do drone apresentado por Bányai (2022), que é igual a 30 Wh/km, além do tempo de funcionamento do drone em cada modelo.

Ao final, é realizada uma média aritmética das emissões por emissão de cada fonte de energia elétrica. No caso deste trabalho são 8 fontes consideradas: carvão, óleo, gás natural, fotovoltaico, água, vento, biomassa (ou bagaço de cana) e nuclear. O cálculo para a emissão em g/km do drone está resumido pela Equação (42).

$$Emissão\ fonte\ [g/km] = \frac{\sum (Taxa\ produção[\%] \cdot Emissão\ [g/kWh] \cdot Consumo\ [kWh/km])}{Número\ de\ fontes\ de\ energia} \quad (42)$$

Ao final, os dados de emissão para CO<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, tanto do furgão quanto do drone, são recalculados como GWP equivalentes em CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e). Uma multiplicação simples é realizada para o CO<sub>2</sub> e o NO<sub>x</sub>, com um fator de recálculo igual a 1 positivo para o CO<sub>2</sub>, e um fator de recálculo igual a 10 positivo para o NO<sub>x</sub>.

Em relação aos cenários, o primeiro cenário é o cenário base, com a utilização somente do furgão. No segundo cenário, considera-se que o furgão e o drone realizam a entrega no conjunto de nós. Por fim, no terceiro cenário considera-se somente o drone para a realização de entregas.

### 3.5 METODOLOGIA PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS

Para o problema do PCV-D, executa-se o código presente nos Apêndices C, D e E, além do código de dados adicionais do Apêndice I, utilizando o solver de PLI GUROBI, no NEOS Server, com  $n=4$ ,  $N_T=2$  e  $N_{OP}=2$  para os dados do Apêndice D, ou  $n=9$ ,  $N_T=4$  e  $N_{OP}=4$  para os dados do Apêndice I. O NEOS Server é um serviço online da Universidade de Wisconsin para resolução de problemas de otimização numérica, e provém acesso a mais de 60 solvers, em mais de 12 categorias de otimização (NEOS Server, 2023, tradução do autor).

É possível interpretar a saída do modelo da seguinte forma: verifica-se as matrizes bidimensionais em  $x[v, k, i]$ , observadas variando primeiramente o valor  $k$ , e após varia-se o valor  $i$  e, com base nisso, quando há uma alteração do valor de  $x[v, k, i]$  em relação a  $v$ , então o furgão realiza um movimento de  $v_A$  em  $i$  para  $v_B$  em  $i+1$ .

Já a matriz  $y[v, k]$  indica quais nós são visitados pelo drone, e em quais operações o respectivo nó é visitado, onde entende-se que o furgão e o drone, em uma operação  $k$ , partem de um nó  $v_A$  na posição 1 da sub-rotina do furgão, e encontram-se na última posição da operação  $k$ , no nó  $v_B$ , enquanto o drone, nessa operação  $k$ , realiza uma entrega em  $v_D$ .

Após, observa-se as matrizes bidimensionais em  $l[v, w, k]$ , variando os valores de  $k$ , e comparam-se com a matriz  $x[v, k, i]$ , onde um movimento realizado na operação  $k$  e na posição  $i$  significa que o furgão realizou o movimento  $l[v_A, v_B, k]$ , e a comparação com a matriz  $y[v_D, k]$  mostra quanto tempo o furgão esperou, seja em  $l[v_A, v_D, k]$  ou em  $l[v_D, v_B, k]$ .

Por fim,  $d[v, w, k]$  possui interpretação mais direta, onde cada matriz de uma operação  $k$  possui somente duas alocações, em  $d[v_A, v_D, k]$  e em  $d[v_D, v_B, k]$ . Além disso, ao se realizar a soma de  $l[v, w, k]$  e  $d[v, w, k]$ , separadamente, têm-se valores iguais à FO.

Para o PCV somente furgão, executa-se o código presente nos Apêndices F, G e H utilizando o solver de PLI GUROBI, no NEOS Server, com  $n=4$ . Se comparada ao PCV-D, a metodologia para interpretação é mais simples, onde a FO apresenta o valor de custo mínimo para percorrer todos os nós, e  $x[v, w]$  representa quais caminhos são percorridos. Assim como no modelo PCV-D, um resultado expandido com 9 nós também é resolvido para comparação.

Para o ESD, realizou-se o cálculo aritmético do somatório, utilizando a equação apresentada no capítulo 2.6.3, baseando-se na matriz de tempos utilizada nos modelos PCV-D e PCV somente furgão. O caminho percorrido pelo drone é sequencial, logo, visita o nó 1, após o nó 2, até o nó  $n$ .

Para o cálculo dos fatores de emissão, considera-se que a tabela utilizada para o cálculo dos modelos apresentados está em relação ao tempo que um furgão necessita para ir de um ponto a outro, e que o furgão tem uma velocidade média de



30 km/h, e o drone, por conta do fator  $\alpha$ , tem uma velocidade igual a 60 km/h. Logo, com o caminho encontrado pelo furgão e pelo drone em cada modelo, é possível encontrar a distância total percorrida para cada modelo.

Com isso, é possível calcular a emissão de poluentes para o drone e o furgão, a partir das distâncias obtidas, e estimar a redução de emissão de poluentes para a frota de veículos existente e a distância anual percorrida.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados os resultados da aplicação dos cenários, das emissões para cada cenário obtido com a aplicação dos modelos formulados no capítulo anterior, além de uma comparação dos resultados da FO e da emissão de poluentes de cada modelo.

### 4.1 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS CENÁRIOS

#### 4.1.1 Resultados do modelo misto (PCV-D)

Com a solução do modelo apresentado no capítulo anterior, utilizando o solver Gurobi, o resultado da FO é igual a 9 minutos, onde o furgão atende somente o nó 2, enquanto o drone atende os nós 3 e 4.

Para o trajeto realizado na operação  $k=1$ , têm-se que o furgão permanece no nó 1 (nó depósito) durante as posições  $i=1$ ,  $i=2$  e  $i=3$ , e visita o nó 2 na posição  $i=4$ , enquanto o drone parte do nó 1 e visita o nó 3 na operação  $k=1$ , retornando ao furgão no nó 2. Já na operação  $k=2$ , o furgão parte do nó 2 na posição  $i=1$ , e visita o nó 1 na posição  $i=2$ , onde permanece nas posições  $i=3$  e  $i=4$ . Já o drone parte do nó 2 e visita o nó 4, retornando ao furgão e, conseqüente, ao depósito no nó 1.

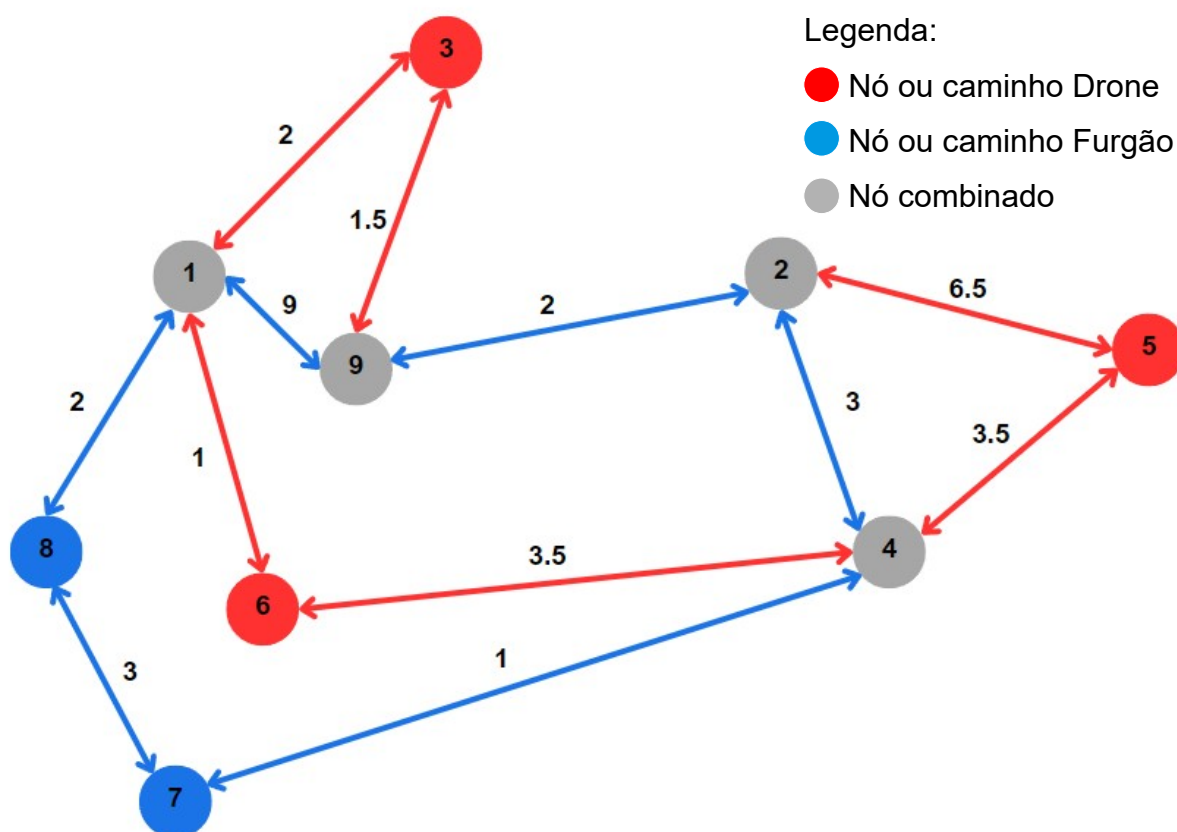
Então, durante a operação  $k=1$ , o furgão tem um tempo de deslocamento igual a 3 minutos, conforme  $l[1,2,2]=3$ , e um tempo de espera no nó 2 igual a 2 minutos, conforme  $l[1,3,2]=2$ , enquanto o drone tem um tempo igual à soma de  $d[1,3,2]=2$  e  $d[3,2,2]=3$ , onde tanto o furgão quanto o drone tem um tempo total de 5 minutos.

Já na operação  $k=2$ , o furgão tem um tempo de deslocamento igual a 3 minutos, conforme  $l[2,1,3]=3$ , e um tempo de espera igual a 1 minuto, conforme  $l[4,1,3]=1$ , enquanto o drone tem um tempo igual à soma de  $d[2,4,3]=1.5$  e  $d[4,1,3]=2.5$ , onde tanto o furgão quanto o drone tem um tempo total de 4 minutos.

Para o segundo conjunto com 9 nós, a FO é igual a 16,5 minutos, e o furgão realiza o seguinte caminho: nó 1, nó 8, nó 7, nó 4, nó 2, nó 9, nó 2 e nó 1, enquanto

o drone percorre o caminho nó 1, nó 6, nó 4, nó 5, nó 9, nó 3 e nó 1. Esse percurso é ilustrado por meio da Figura 10, onde os nós azuis são os nós caminhões, os nós vermelhos são nós drones e os nós cinzas são os nós conjuntos. Nota-se que a leitura do resultado obtido é de difícil leitura, e requer a interpretação manual das tabelas.

Figura 10 – Grafo representando o conjunto com 9 nós do PCV-D



Fonte: Autoria própria.

Além disso, testou-se um conjunto com 10 nós no NEOS Server, utilizando os dados do arquivo “data\_modif3.dat” do Apêndice J para tanto, porém o servidor encerrou a tarefa de execução do código por exceder a memória máxima alocada.

#### 4.1.2 Resultados do modelo somente furgão (PCV)

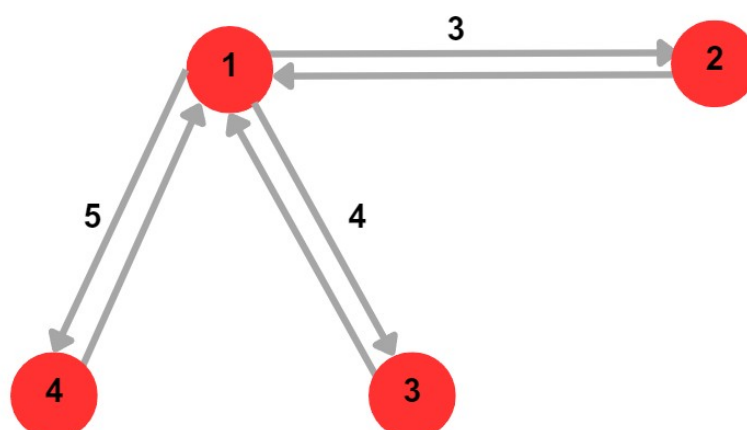
A resolução do modelo PCV somente furgão resulta em uma FO igual a 17 minutos, onde o furgão parte do nó 1 e visita os nós 2, 4, 3 e retorna ao nó 1, nessa

seqüência. Para o segundo conjunto com 9 nós, a FO é igual a 27, com o caminho nó 1, nó 8, nó 7, nó 4, nó 2, nó 9, nó 3, nó 5, nó 6 e nó 1.

### 4.1.3 Resultados do modelo ESD

O cálculo do modelo ESD gera o resultado da FO de 6 minutos, para o grafo de 4 nós, onde o caminho percorrido pode ser determinado de maneira arbitrária, conforme abordado na Seção 3.5. Nesse caso, o drone parte do nó 1, visita o nó 2 e retorna ao nó 1, fazendo o mesmo para os nós subsequentes, sendo o nó de partida e retorno sendo sempre o nó 1, conforme a Figura 11. Já para o grafo de 9 nós, tem-se o resultado da FO igual a 47 minutos.

Figura 11 – Grafo do caminho percorrido pelo drone no Cenário ESP, com 4 nós



Fonte: Autoria própria.

## 4.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Comparando-se os resultados da FO de cada modelo, nota-se que, para a rede de nós considerada, com 4 nós, o melhor resultado foi do cenário PCV-D, com uma FO de 9 minutos, seguido do cenário ESD, com uma FO de 12 minutos e, por fim, o cenário PCV somente furgão, com uma FO de 17 minutos. É necessário ressaltar que a FO do cenário PCV-D inclui o tempo de deslocamento total do drone, do caminhão e o tempo total de espera do caminhão.

Então, o modelo PCV-D apresenta uma redução de 47,06% no tempo total de entrega se comparado ao modelo PCV somente furgão, enquanto o modelo ESD apresenta uma redução de 29,41% no tempo total de entrega se comparado ao

cenário PCV somente furgão. Para o conjunto com 9 nós, houve uma redução no tempo de entrega em 38,89% para o cenário PCV-D, e um aumento de 74,07% no tempo de entrega para o cenário ESD.

Em relação às distâncias percorridas, para 4 nós o furgão percorre 8,5 km no cenário PCV somente furgão, e 3 km no cenário PCV-D, enquanto o drone percorre 9km no cenário PCV-D e 12km no cenário ESD. Para 9 nós, o furgão percorre 13,5 km no cenário PCV somente furgão e 8km no cenário PCV-D, enquanto o drone percorre 13,5km no cenário PCV-D e 47km no cenário ESD. Todos os resultados apresentados estão resumidos na Tabela 4.

Tabela 4 – Distância percorrida pelo furgão e o drone, e a redução percentual em relação ao modelo PCV somente furgão

Tipo de trajeto	Distância Caminhão (km)	Distância Drone (km)	Tempo total (min)	Redução (%)
PCV Furgão (4 nós)	8,5	0,0	17,0	-
PCV-D (4 nós)	3,0	9,0	9,0	47,06%
ESD (4 nós)	0,0	12,0	24,0	-41,18%
PCV Furgão (9 nós)	13,5	0,0	27,0	-
PCV-D (9 nós)	8,0	13,5	16,5	38,89%
ESD (9 nós)	0,0	47,0	47,0	-74,07%

Fonte: Autoria própria.

#### 4.3 EMISSÃO DE POLUENTES DOS MODELOS

Seguindo a metodologia apresentada na Seção 3.5, chegou-se aos resultados apresentados na Tabela 5, para o cálculo dos fatores de emissão de poluentes para o furgão, e na Tabela 6 em relação ao cálculo para emissão do drone. Para a análise da emissão de MP, a Tabela 6 mostra que o drone possui uma emissão aproximadamente igual a zero, portanto somente a análise da Tabela 5 é considerada para as emissões de MP. Então, o cenário PCV-D apresentou uma redução de 66,67% e 42,86% na emissão de MP, para 4 e 9 nós, respectivamente.

Tabela 5 – Cálculo dos fatores de emissão de poluente para o furgão

Cenários	Distância Caminhão (km)	CO <sub>2</sub> (g)	NOx (g)	MP (g)	CO <sub>2</sub> e (g)
PCV Furgão (4 nós)	8,5	2,368	5,151	0,009	53,878
PCV-D (4 nós)	3,0	0,836	1,818	0,003	19,016
ESD (4 nós)	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000
PCV Furgão (9 nós)	13,5	3,760	8,181	0,014	85,570
PCV-D (9 nós)	8,0	2,228	4,848	0,008	50,708
ESD (9 nós)	0,0	0,000	0,000	0,000	0,000

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 6 – Cálculo dos fatores de emissão de poluente para o drone

Cenários	Distância Drone (km)	CO <sub>2</sub> (g)	NOx (g)	MP (g)	CO <sub>2</sub> e (g)
PCV Furgão (4 nós)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PCV-D (4 nós)	9,000	2,658	0,044	0,000	3,095
ESD (4 nós)	12,000	3,544	0,058	0,000	4,126
PCV Furgão (9 nós)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
PCV-D (9 nós)	13,500	3,987	0,066	0,000	4,642
ESD (9 nós)	47,000	13,880	0,228	0,000	16,161

Fonte: Autoria Própria.

Com os fatores de emissão calculados, e convertidos para CO<sub>2</sub>e, é possível reunir os resultados e comparar as emissões para os diferentes modelos, conforme apresentado na Tabela 7. Por meio das Tabelas 4 e 7, é possível analisar os resultados finais do tempo necessário para percorrer todos os nós, além dos resultados de CO<sub>2</sub>e para cada modelo.

Tabela 7 – Cálculo das diferenças de emissão entre cenários

Cenários	CO <sub>2</sub> e (g) caminhão	CO <sub>2</sub> e (g) drone	CO <sub>2</sub> e (g) soma	Diferença CO <sub>2</sub> e (%)
PCV Furgão (4 nós)	53,878	0,000	53,878	-
PCV-D (4 nós)	19,016	3,095	22,110	58,96%
ESD (4 nós)	0,000	4,126	4,126	92,34%
PCV Furgão (9 nós)	85,570	0,000	85,570	-
PCV-D (9 nós)	50,708	4,642	55,350	35,32%
ESD (9 nós)	0,000	16,161	16,161	81,11%

Fonte: Autoria própria.

Ao se analisar a Tabela 4, nota-se uma redução do tempo de atendimento em 47,06% e 38,89% para os grafos de 4 nós e 9 nós no cenário PCV-D, se comparado

ao cenário PCV somente furgão, enquanto o cenário ESD apresentou um aumento do tempo de atendimento em 41,18% e 74,07% para os grafos de 4 nós e 9 nós, se comparado ao cenário PCV somente furgão.

Já para a Tabela 7, tanto o cenário PCV-D quanto o cenário ESD apresentaram redução para as emissões CO<sub>2</sub>e. Para os cenários PCV-D e ESD em comparação com o cenário PCV somente furgão, a diferença é de 58,96% e 92,34% da emissão de CO<sub>2</sub>e para o grafo de 4 nós, e a mesma comparação para o grafo de 9 nós apresenta uma diferença de 35,32% e 81,11% da emissão de CO<sub>2</sub>e.

Nota-se que o cenário PCV-D apresenta uma redução significativa tempo de atendimento e das emissões de CO<sub>2</sub>e, enquanto o cenário ESD teve um aumento expressivo do tempo de atendimento, porém a melhor redução em termos de emissão de CO<sub>2</sub>e. Para os valores de emissão de MP, o cenário PCV-D apresentou uma redução de 66,67% em comparação com o cenário PCV somente furgão, e o modelo ESD apresentou uma redução calculada de 100%.

Nota-se que os resultados obtidos para a emissão de poluentes nos cenários envolve apenas os gastos energéticos tanto do drone quanto do caminhão, e que não há nenhuma análise em relação ao ciclo de vida de ambos, assim como a análise da emissão de poluentes da bateria do drone.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresentou-se ao longo do trabalho uma das possíveis soluções para reduzir as emissões de veículos a diesel, utilizando drones conjuntamente com caminhões semileves em entregas de última milha.

A redução do tempo total para percorrer os nós, em 47,06% para 4 nós, e 38,89% para 9 nós, além da redução simultânea na emissão de poluentes, em 58,96% e 35,32%, é expressiva. Baldisseri et al. (2022) também aborda que o uso de drones em entregas com caminhões leva a uma redução de custos de 12% a 26%, comparado à entregas somente com caminhões, que é uma redução significativa.

No entanto, é necessário notar que os estudos de Baldisseri et al. (2022) trazem a análise dos ciclos de vida tanto do drone quanto do furgão, e que essa análise é necessária para o melhor entendimento da redução real na emissão de poluentes.

Além disso, o modelo apresentado na Seção 3.3 tem uma alta complexidade computacional, falhando na execução de uma rede pequena com apenas 10 nós, em virtude de se utilizar o NEOS Server, que possui limitações quanto à memória máxima para a execução de um determinado programa, além do fato de que o problema é do tipo NP-Hard.

A respeito da obtenção do trajeto e, conseqüentemente, das distâncias realizadas pelo drone e o furgão no modelo PCV-D, é notado que a modelagem matemática adaptada de Agatz, Bouman e Schmidt (2015) não é de leitura simples.

Dito isso, ainda que não se tenham relatados os resultados financeiros de entregas utilizando somente drone, é possível concluir que o cenário PCV-D foi o melhor apresentado, e que sua aplicação dentro do âmbito da logística urbana é viável, trazendo economia financeira, maior agilidade nas entregas e redução da emissão de poluentes.

Porém, em virtude da difícil obtenção da rota do drone e do furgão, e também pelo fato da execução do algoritmo falhar com apenas 10 nós, sugere-se



para trabalhos futuros a aplicação de um método mais eficiente para resolução do problema, ou uma aplicação do algoritmo adaptado com uma nova revisão.

Ademais, para trabalhos futuros, indica-se a realização de um estudo aprofundado em relação à emissão de poluentes, analisando-se o ciclo de vida tanto do drone quanto do furgão.

Indica-se também para estudos futuros a aplicação de um método não exato utilizando dados reais, para medir com maior exatidão os resultados de redução de tempo e emissão de poluentes, também considerando a assimetria do caminho, e o congestionamento em determinados horários e vias.

Além disso, indica-se a análise das operações da empresa Speedbird, citada na Seção 2.3.2, sua atuação no mercado e a operação em si utilizando drones.

## REFERÊNCIAS

ACKERMAN, Evan. **In the Air With Zipline's Medical Delivery Drones**. IEEE Spectrum. 2019. Disponível em: <<https://spectrum.ieee.org/in-the-air-with-ziplines-medical-delivery-drones>>. Acesso em 11 junho 2023.

AGATZ, Niels. BOUMAN, Paul. SCHMIDT, Marie. **Optimization Approaches for the Traveling Salesman Problem with Drone**. SSRN, 2015, n. 11.

AMPL. **History of AMPL**. 2023. Disponível em: <https://ampl.com/about/> Acesso em 10 dez 2023.

ANAC. **Voo pairado**. 2012. Disponível em: [https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por\\_ing/tr1571.htm](https://www2.anac.gov.br/anacpedia/por_ing/tr1571.htm) Acesso em 09 dez 2023.

BALDISSERI, Andrea et al.. **Truck-based drone delivery system: An economic and environmental assessment**, Transportation Research Part D: Transport and Environment, n. 107, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103296>> Acesso em 11 jun 2023.

BALLOU, Ronald. **Gerenciamento da cadeia de suprimento/ Logística empresarial**. Porto Alegre: Brookman, 2006.

BÁNYAI, Tamás. **Impact of the Integration of First-Mile and Last-Mile Drone-Based Operations from Trucks on Energy Efficiency and the Environment**, Drones, 2022, n. 6, p.249-278. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/drones6090249>> Acesso em 10 maio 2023.

BARR, Alistair. **Amazon testing delivery by drone, CEO Bezos says**. 2013. USA Today. Disponível em: <<https://www.usatoday.com/story/tech/2013/12/01/amazon-bezos-drone-delivery/3799021/>>. Acesso em 6 junho 2023.

BASSETO, Murilo. **Para impulsionar logística por drones no Brasil e no mundo, brasileira Speedbird levanta R\$ 10 milhões**. Aeroin: 4 agosto 2023. Disponível em: <<https://aeroin.net/para-impulsionar-logistica-por-drones-no-brasil-e-no-mundo-brasileira-speedbird-levanta-r-10-milhoes/>>. Acesso em 22 novembro 2023.

BOYSEN, Nils. FEDTKE, Stefan. SCHWERDFEGGER, Stefan. **Last-mile delivery concepts: a survey from an operational research perspective**. OR Spectrum, 2021, v. 43, ed. 1. P. 1-58.

**Building the first logistics system that serves all people equally**. Zipline. 2023. Disponível em: <<https://www.flyzipline.com/about>>. Acesso em 22 novembro 2023.

BUIS, Alan. **Steamy Relationships: How Atmospheric Water Vapor Amplifies Earth's Greenhouse Effect**. 8 fevereiro 2022. Disponível em: <https://climate.nasa.gov/explore/ask-nasa-climate/3143/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect/#:~:text=Water>

%20vapor%20is%20Earth%27s%20most,atmosphere%20trap%20the%20Sun%27s%20heat. Acesso em 09 dezembro 2023.

CAPES Periódicos. **Quem somos**. 2023. Disponível em: <<https://www-periodicos-capes-gov-br.ez1.periodicos.capes.gov.br/index.php/sobre/quem-somos.html>> Acesso em 17 junho 2023.

CARBON, David. **First deliveries from our new sites in TX and CA. Couldn't be prouder of the amazing people that make up Prime Air. These are careful first steps that we will turn into giant leaps for our customers over the next number of years. Customers are our obsession, safety is our imperative, the future of delivery is our mandate, technology is unlocking that future and our people are the foundation that it all sits on! For all those who work at Prime Air...I humbly bow before you in thanks!!!** LinkedIn: David Carbon. Disponível em: <[https://www.linkedin.com/posts/dcarbon\\_first-deliveries-from-our-new-sites-in-tx-activity-7012116812746149888-EoHr](https://www.linkedin.com/posts/dcarbon_first-deliveries-from-our-new-sites-in-tx-activity-7012116812746149888-EoHr)> Acesso em 11 junho 2023.

Classification of Drones – Unmanned Aircraft Systems – Unmanned Aerial Vehicles. Drone Trest. 2023. Disponível em: <<https://www.dronetrest.com/t/classification-of-drones-unmanned-aircraft-systems-unmanned-aerial-vehicles/9835>> Acesso em 10 junho 2023.

CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo**. São Paulo. 2022. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>> Acesso em 14 novembro 2023.

CHRISTOFIDES, Nicos. **Graph theory: An algorithmic approach**. Orlando FL: Academic Press, 1975.

DALY, David. **A Not-So-Short History of Unmanned Aerial Vehicles (UAV)**. Consortiq. 2023. Disponível em: <<https://consortiq.com/uas-resources/short-history-unmanned-aerial-vehicles-uavs>>. Acesso em 8 junho 2023.

De Havilland DH82B Queen Bee. De Havilland Museum. Disponível em: <<https://www.dehavillandmuseum.co.uk/aircraft/de-havilland-dh82b-queen-bee/>>. Acesso em 6 junho 2023.

DESROCHERS, Martin. LAPORTE, Gilbert. **Improvements and extensions to the Miller-Tucker-Zemlin subtour elimination constraints**. Operations Research Letters, v. 10, ed. 1, 1991, p. 27-36.

DENMAN, Kenneth L. et al.. **Couplings Between Changes in the Climate System and Biogeochemistry**. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, 2007. P. 499-588.

DUKOWITZ, Zacc. **Amazon Only Made Drone Deliveries to 10 Houses in the First Month of Its New Programs—Here's Why**. UAV Coach, 2023. Disponível em: <<https://uavcoach.com/amazon-challenges-2023/>>. Acesso em 14 novembro 2023.

DUN, Craig. HORTON, Gareth. KOLLAMTHODI, Sujith. **Improvements to the definition of lifetime mileage of light duty vehicles**. 2015. Disponível em:

<[https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/ldv\\_mileage\\_improvement\\_en.pdf](https://climate.ec.europa.eu/system/files/2016-11/ldv_mileage_improvement_en.pdf)>. Acesso em 19 novembro 2015.

DRONE. *In*: MERRIAM-WEBSTER. 2023. Disponível em: <<https://www.merriam-webster.com/dictionary/drone>>. Acesso em: 8 junho 2023.

EPA. **Overview of Greenhouse Gases.** 2023. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>. Acesso em 03 novembro 2023.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica.** 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em 18 novembro 2023.

ePowerTrucks. **What Does First, Middle, & Last Mile Delivery Mean?** <https://www.epowertrucks.co.uk/news/what-does-first-middle-last-mile-delivery-mean/#:~:text=First%20mile%20delivery%20is%20typically,to%20the%20retailer%27s%20distribution%20center>. Acesso em 9 dez 2023.

European Commission. **Causes of climate change.** Disponível em: <[https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en#:~:text=Burning%20fossil%20fuels%2C%20cutting%20down,greenhouse%20effect%20and%20global%20warming.](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en#:~:text=Burning%20fossil%20fuels%2C%20cutting%20down,greenhouse%20effect%20and%20global%20warming.)> Acesso em 22 agosto 2023.

FREIGHT WAVES. **Walmart and DroneUp expanding drone delivery to 6 states, 4 million people.** 2022. Disponível em: <<https://www.freightwaves.com/news/walmart-droneup-expanding-drone-delivery-to-six-us-states>>. Acesso em 14 novembro 2023.

FUEST, Benedikt. **DHL testet erstmals Paketlieferung per Drohne.** Welt. 2013. Disponível em: <<https://www.welt.de/wirtschaft/article122747484/DHL-testet-erstmals-Paketlieferung-per-Drohne.html>>. Acesso em 6 junho 2023.

GOLDBARG, Marco César. LUNA, Henrique Pacca L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos.** Rio de Janeiro: Elsevier, ed. 2, 2005.

GOODIN, R. E. et al. **The time-pressure illusion: Discretionary time vs. free time.** Social Indicators Research, v. 73, 1 ed, 2005, p. 43-70.

HALL, Mark. **Amazon.com.** Britannica. 2023. Disponível em: <<https://www.britannica.com/topic/Amazoncom>>. Acesso em 25 maio 2023.

Himmelfarb Health Sciences Library. **Study Design 101: Meta-Analysis.** 2023. Disponível em: <https://guides.himmelfarb.gwu.edu/studydesign101/metaanalysis> Acesso em 13 nov. 2023.

HERRICK, Shaw. **What's The Difference Between A Drone, UAV and UAS?** 2017. Botlink. Disponível em: <<https://botlink.com/blog/whats-the-difference-between-a-drone-uav-and-uas>>. Acesso em 6 junho 2023.

IPCC. **CLIMATE CHANGE 2023: Synthesis Report.** 2023. Geneva: IPCC.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change.** 2022. Geneva: IPCC.

KHAIR, M. K. MAJEWSKI, W. A. **Diesel Emissions and Their Control**. SAE INTERNATIONAL. 2006.

KWEKU, Darkwah Williams et al.. Greenhouse Effect: Greenhouse Gases and Their Impact on Global Warming. **Journal of Scientific Research and Reports**, n. 17, p. 1-9, 2017.

LACIS, Andrew A., et al. **Atmospheric CO<sub>2</sub>: Principal Control Knob Governing Earth's Temperature**. Nova Iorque NY, Science, v. 330, 6002 ed., 2010, p. 356-359.

LAMMEL, G. GRAßL, H. **Greenhouse effect of NO<sub>x</sub>**. Berlin, Environmental Science and Pollution Research International, v. 2, 1 ed., 1995.

LASEK, Janusz Andrzej. LAJNERT, Radosław. On the Issues of NO<sub>x</sub> as Greenhouse Gases: An Ongoing Discussion. Zabrze, Applied Sciences, v. 12, 20 ed., 2022.

Mercedes-Benz. **Sprinter Furgão: Espaço e tecnologia para otimizar a logística do seu transporte**. 2023. Disponível em: <[https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/sprinter/furgao/dados-tecnicos/dados\\_tecnicos\\_sprinter\\_furgao.pdf](https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/sprinter/furgao/dados-tecnicos/dados_tecnicos_sprinter_furgao.pdf)> Acesso em 15 novembro 2023.

MILLER, C.E., TUCKER, A.W. e ZEMLIN, R.A. Integer Programming Formulations and Traveling Salesman Problems. **Association for Computing Machinery**, New York, v. 7, 3 ed., p. 326-329, out. 1960.

Ministério dos Transportes. **Frota de Veículos – 2023**. 2023. Disponível em: <<https://www.gov.br/transportes/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>>. Acesso em 19 novembro 2023.

Montgomery Wards. **Welcome to Wards: America's Most Trusted Retailer for Over 150 years**. 2023. Disponível em: <<https://www.wards.com/cm/history-about-us.html>> Acesso em 22 novembro 2023.

MULLER, Joann. **Walmart to begin America's first large-scale drone operation in 6 states**. Axios, 2022. Disponível em: <<https://www.axios.com/2022/05/24/walmart-drone-delivery-droneup-packages-doorstep-home>>. Acesso em 14 novembro 2023.

National Geographic. **The Greenhouse Effect and our Planet**. 2023. Disponível em: <<https://education.nationalgeographic.org/resource/greenhouse-effect-our-planet/>>. Acesso em 22 novembro 2023.

DRSKA, Moacir. **Na Speedbird Aero, a próxima entrega será internacional**. Neofeed: 23 dezembro 2022. Disponível em: <<https://neofeed.com.br/blog/home/na-speedbird-aero-a-proxima-entrega-sera-a-expansao-internacional/>>. Acesso em 22 novembro 2023.

NEOS Server. **NEOS Server Solvers**. Disponível em: <<https://neos-server.org/neos/solvers/index.html>> Acesso em 04 nov. 2023.

NOAA: National Centers for Environmental Information. Annual 2022 Global Climate Report. 2022. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213>>. Acesso em 22 agosto 2023.

NOVAES, Antônio Galvão. **Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007. 400 p.

OLLINGER, Scott V. **Interactive effects of nitrogen deposition, tropospheric ozone, elevated CO<sub>2</sub> and land use history on the carbon dynamics of northern hardwood forests**. *Global Change Biology*, Hoboken, v. 8, 2002, p. 545-562.

PAGE, Matthew J. et al. **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews**. *British Medical Journal*, v. 372, 71 ed. 2021.

PALMER, Annie. Amazon's drone business can't get off the ground as regulations, weak demand stymie progress, CNBC, 2023. Disponível em: <<https://www.cnbc.com/2023/03/11/amazon-prime-air-drone-business-stymied-by-regulations-weak-demand.html>>. Acesso em 11 junho 2023.

CDC. **Particulate Pollution**. 2023. Disponível em: <[https://www.cdc.gov/air/particulate\\_matter.html](https://www.cdc.gov/air/particulate_matter.html)>. Acesso em 11 junho 2023.

PRATHER, M. J. **Lifetimes of atmospheric species: integrating environmental impacts**. *Geophysical Research Letters*, São Francisco CA, v. 29, ed. 22, 2002.

PRISMA. **History & Development of PRISMA**. 2023a. Disponível em: <<http://www.prisma-statement.org/PRISMAStatement/HistoryAndDevelopment>> Acesso em 10 maio 2023.

PRISMA. Welcome to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) website. 2023b. Disponível em: <<http://www.prisma-statement.org>> Acesso em 10 maio 2023.

RENNIE, James. **Drone Types: Multi-Rotor vs Fixed-Wing vs Single Rotor vs Hybrid VTOL**. AUAV. 2016. Disponível em: <<https://www.auav.com.au/articles/drone-types/>>. Acesso em 11 junho 2023.

REŞİTOĞLU, İbrahim Aslan. ALTINIŞIK, Kemal. KESKIN, Ali. **The pollutant emissions from diesel-engine vehicles and exhaust after treatment systems**. *Clean Technologies and Environmental Policy*, ed. 17, 2015, p. 15-27.

ROTH, Jonathan P. **The Logistics of the Roman Army at War (264 B.C. - A.D. 235)**. 1. ed, v. 23. Leiden, Boston, Colônia: Brill, 1998. 399 p. (Série Columbia Studies in the Classical Tradition).

SILVA, Jefferson Renan Santos, et al. **COMPARAÇÃO DOS COMBUSTÍVEIS DÍESEL S10 E S500 PARA RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS EM MOTORES DO CICLO DÍESEL**. In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 4., 2017, Belém. **Anais...** Belém: CONFEA, 2017.

Speedbird Aero. **DLV-2 Aircraft**. 2023. Disponível em: <<https://www.speedbird.aero/#technology>>. Acesso em 22 novembro 2023.

SZOLLOS, Alex. **Toward a psychology of chronic time pressure: Conceptual and methodological review**. Ed. 2-3, v. 18. Sage Journals, 2009. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0961463X09337847>> Acesso em 25 maio 2023.

TURI, Jon. **Tesla's toy boat:** A drone before its time. 2019. Engadget. Disponível em: <<https://www.engadget.com/2014-01-19-nikola-teslas-remote-control-boat.html>>. Acesso em 7 junho 2023.

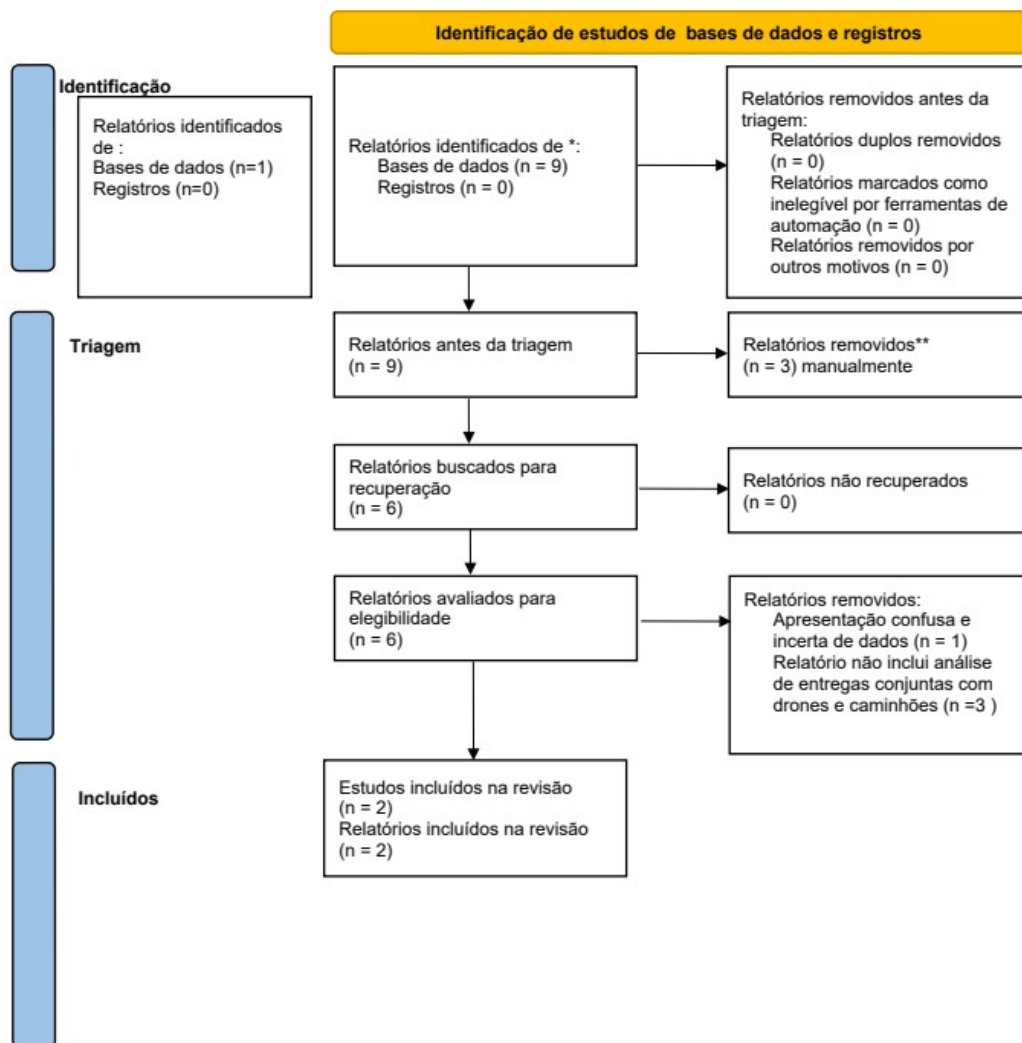
TURNER, Michelle C. et al. **Long-term Ambient Fine Particulate Matter Air Pollution and Lung Cancer in a Large Cohort of Never-Smokers.** American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Nova Iorque NY, v. 184, ed. 12, 2011, p. 1374-1381.

ZWASS, Vladimir. **e-commerce.** Britannica. 2023. Disponível em: <<https://www.britannica.com/technology/e-commerce>>. Acesso em 25 maio 2023.

**Zipline Obtains Important Certification for Drone Delivery Operations.** LATAM Mobility. 2023. Disponível em: <<https://latamobility.com/en/zipline-obtains-important-certification-for-drone-delivery-operations/>>. Acesso em 11 junho 2023.

## APÊNDICE A – Diagrama de fluxo PRISMA 2020 aplicado para o trabalho

Diagrama de fluxo PRISMA 2020 para revisões sistemáticas que incluem pesquisas em bases de dados e Relatórios





## APÊNDICE B – Checklist PRISMA 2020

PRISMA 2020 Checklist			Location where item is reported
Section and Topic	Item #	Checklist Item	
<b>TÍTULO</b>			
Título	1	Identify the report as a systematic review.	
<b>RESUMO</b>			
Resumo	2	See the PRISMA 2020 for Abstracts checklist	
<b>INTRODUÇÃO</b>			
Justificativa	3	Describe the rationale for the review in the context of existing knowledge.	
Objetivos	4	Provide an explicit statement of the objective(s) or question(s) the review addresses.	
<b>METHODS</b>			
Crerios de elegibilidade	5	Specify the inclusion and exclusion criteria for the review and how studies were grouped for the syntheses.	
Fontes de informao	6	Specify all databases, registers, websites, organisations, reference lists and other sources searched or consulted to identify studies. Specify the date when each source was last searched or consulted.	
Estratgia de busca	7	Present the full search strategies for all databases, registers and websites, including any filters and limits used.	
Processo de seleo	8	Specify the methods used to decide whether a study met the inclusion criteria of the review, including how many reviewers screened each record and each report retrieved, whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Processo de coleta de dados	9	Specify the methods used to collect data from reports, including how many reviewers collected data from each report, whether they worked independently, any processes for obtaining or confirming data from study investigators, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Itens de dados	10a	List and define all outcomes for which data were sought. Specify whether all results that were compatible with each outcome domain in each study were sought (e.g. for all measures, time points, analyses), and if not, the methods used to decide which results to collect.	
	10b	List and define all other variables for which data were sought (e.g. participant and intervention characteristics, funding sources). Describe any assumptions made about any missing or unclear information.	
Risco de estudo de avaliao de vies	11	Specify the methods used to assess risk of bias in the included studies, including details of the tool(s) used, how many reviewers assessed each study and whether they worked independently, and if applicable, details of automation tools used in the process.	
Medidas de efeito	12	Specify for each outcome the effect measure(s) (e.g. risk ratio, mean difference) used in the synthesis or presentation of results.	
Métodos de síntese	13a	Describe the processes used to decide which studies were eligible for each synthesis (e.g. tabulating the study intervention characteristics and comparing against the planned groups for each synthesis (item #5)).	
	13b	Describe any methods required to prepare the data for presentation or synthesis, such as handling of missing summary statistics, or data conversions.	
	13c	Describe any methods used to tabulate or visually display results of individual studies and syntheses.	
	13d	Describe any methods used to synthesize results and provide a rationale for the choice(s). If meta-analysis was performed, describe the model(s), method(s) to identify the presence and extent of statistical heterogeneity, and software package(s) used.	
	13e	Describe any methods used to explore possible causes of heterogeneity among study results (e.g. subgroup analysis, meta-regression).	
	13f	Describe any sensitivity analyses conducted to assess robustness of the synthesized results.	
Avaliao de vies do relatrio	14	Describe any methods used to assess risk of bias due to missing results in a synthesis (arising from reporting biases).	

## APÊNDICE C – Arquivo “model\_modif.mod” em AMPL do modelo PCV-D

```

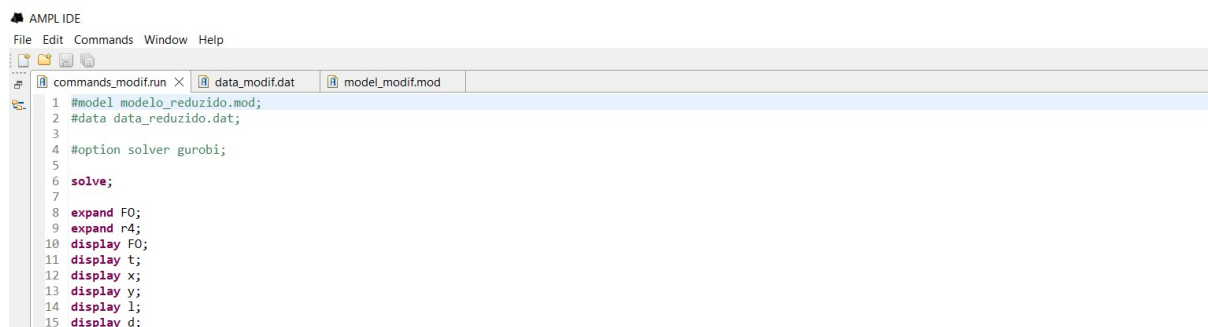
1 param Nop;          ##numero de operacoes totais do sistema;
2 param Nt;          ##numero de operacoes do caminhao;
3 param alpha;      ##constante de ajuste de tempo do drone, aumentando velocidade do drone comparado com caminhao
4 param n;          ##determina o numero de nos;
5 param tmax;      ##tempo maximo de voo do drone;
6
7 set V;            ##conjunto de nos
8
9 param cvw {V,V};  ##matriz de tempo para ir de um no a outro
10
11 var d {v in V, w in V, k in 2 .. Nop+1} >= 0;          ##(18a) ##variavel determinando tempo de deslocamento do drone entre os nos v e w na operacao k;
12 var l {v in V, w in V, k in 2 .. Nop+1} >= 0;          ##(18b) ##variavel determinando tempo de deslocamento do caminhao entre os nos v e w na operacao k;
13
14 var x {v in V, k in 2 .. Nop+1, i in 1 .. Nt+2} binary; ##(17a) ##variavel determinando operacao do caminhao;
15 var y {v in V, k in 2 .. Nop+1} binary;                ##(17b) ##variavel determinando que operacao a operacao k tenha no maximo um no de drone;
16 var t {k in 2 .. Nop+1};                               ##variavel objetivo determinando tempo maximo da operacao;
17
18 minimize F0: sum {k in 2 .. Nop+1} t[k]; ##minimiza a soma do tempo total necessario para servir a todos os clientes com caminhao e drone ##4;
19
20 subject to r1 {v in V}: sum{k in 2 .. Nop+1} (y[v,k] + sum{i in 1 .. Nt+2} x[v,k,i]) >= 1; ##5;
21
22 subject to r2 : x[1, 2, 1] = 1; ##6;
23
24 subject to r3 : x[1, Nop + 1, Nt + 2] = 1; ##7;
25
26 subject to r4 {v in V, k in 2 .. Nop}: x[v,k,Nt + 2] = x[v,k + 1,1]; ##8;
27
28 subject to r5 {k in 2 .. Nop+1}: sum{v in V} y[v,k] <= 1; ##9;
29
30 subject to r6 {k in 2 .. Nop+1, i in 1 .. Nt + 2}: sum{v in V} x[v,k,i] = 1; ##10;
31
32 subject to r7 {v in V, w in V, k in 2 .. Nop+1}: d[v,w,k] >= alpha * cvw[v,w] * (x[v,k,1] + y[w,k] - 1); ##11;
33
34 subject to r8 {v in V, w in V, k in 2 .. Nop+1}: d[v,w,k] >= alpha * cvw[v,w] * (x[w,k,Nt + 2] + y[v,k] - 1); ##12;
35
36 subject to r9 {k in 2 .. Nop+1}: t[k] >= sum{v in V, w in V} d[v,w,k]; ##13;
37
38 subject to r10 {k in 2 .. Nop+1}: sum{v in V, w in V} d[v,w,k] <= tmax; ##14;
39
40 subject to r11 {v in V, w in V, k in 2 .. Nop+1, i in 1 .. Nt+1: v != w}: l[v,w,k] >= cvw[v,w] * (x[v,k,i] + x[w,k,i + 1] - 1); ##15;
41
42 subject to r12 {k in 2 .. Nop+1}: t[k] >= sum{v in V, w in V} l[v,w,k]; ##16;

```

## APÊNDICE D – Arquivo “data\_modif.dat” em AMPL do modelo PCV-D

```
1 param n := 4;
2 param Nop := 2;
3 param Nt := 2;
4 param alpha := 0.5;
5 param tmax := 16;
6
7 set V := 1 2 3 4;
8
9 param cvw :
10      1 2 3 4 :=
11 1 9999 3 4 5
12 2 3 9999 6 3
13 3 4 6 9999 7
14 4 5 3 7 9999;
```

## APÊNDICE E – Arquivo “commands\_modif.run” em AMPL do modelo PCV-D



The screenshot shows the AMPL IDE interface. The title bar reads "AMPL IDE" and the menu bar includes "File", "Edit", "Commands", "Window", and "Help". The window title bar shows three open files: "commands\_modif.run", "data\_modif.dat", and "model\_modif.mod". The main editor area displays the following code:

```
1 #model modelo_reduzido.mod;
2 #data data_reduzido.dat;
3
4 #option solver gurobi;
5
6 solve;
7
8 expand F0;
9 expand r4;
10 display F0;
11 display t;
12 display x;
13 display y;
14 display l;
15 display d;
```

## APÊNDICE F – Arquivo “data\_truck.dat” em AMPL do modelo PCV somente furgão

```
1 param n := 9;
2 param Nop := 4;
3 param Nt := 4;
4 param alpha := 0.5;
5 param tmax := 16;
6
7 set v := 1 2 3 4 5 6 7 8 9;
8
9 param cvw :
10      1 2 3 4 5 6 7 8 9:=
11 1    9999 3 4 5 9 2 15 2 7
12 2    3 9999 6 3 13 12 15 5 2
13 3    4 6 9999 7 6 13 6 8 3
14 4    5 3 7 9999 7 7 1 6 11
15 5    9 13 6 7 9999 5 9 7 4
16 6    2 12 13 7 5 9999 3 6 8
17 7    15 15 6 1 9 3 9999 3 5
18 8    2 5 8 6 7 6 3 9999 14
19 9    7 2 3 11 4 8 5 14 9999;
```

## APÊNDICE G – Arquivo “model\_truck.mod” em AMPL do modelo PCV somente furgão

```
1 param n;
2
3 set V;          ##conjunto de nos
4
5 param c {V,V} ;    ##matriz de tempo para ir de um no a outro
6
7 var u {i in 1..n};
8 var x {v in V, w in V} binary;    ##(17a)    ##variavel determinando sequenciamento do trajeto do caminhao;
9
10 minimize FO: sum {j in 1..n} sum{i in 1..n} c[i,j]*x[i,j];
11
12 subject to r1 {j in 2..n}: (sum {i in 1..n: i != j} x[i,j]) = 1;
13
14 subject to r2 {i in 2..n}: (sum {j in 1..n: i != j} x[i,j]) = 1;
15
16 subject to r3 {i in 2..n, j in 2..n: i != j}: u[i] - u[j] + (n-1)*x[i,j] <= n-2;
17
18 subject to r4 {i in 2..n}: 1 <= u[i] <= n-1;
19
```

## APÊNDICE H – Arquivo “commands\_truck.run” em AMPL do modelo PCV somente furgão

```
1 solve;  
2  
3 display FO;  
4 display x;
```

## APÊNDICE I – Arquivo “model\_truck2.mod” em AMPL do modelo PCV somente furgão

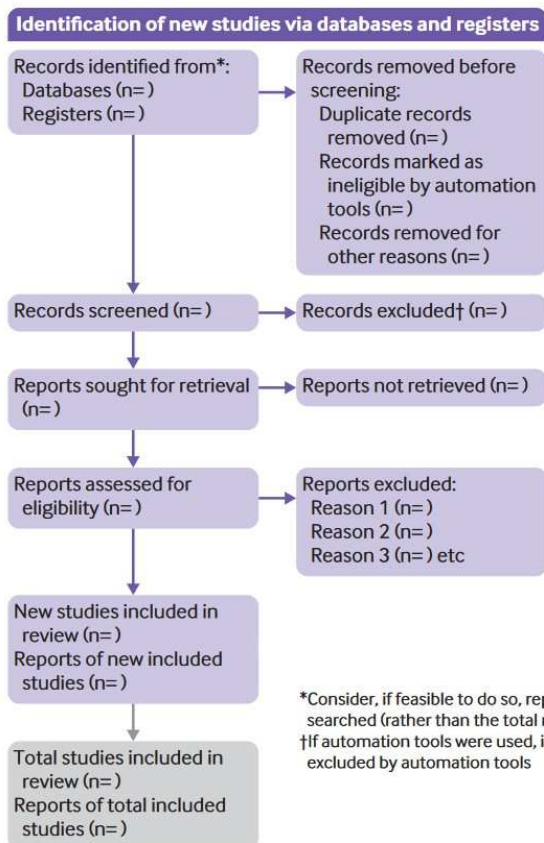
```
1 param n := 9;
2
3 set V := 1 2 3 4 5 6 7 8 9;
4
5 param c :
6 1 2 3 4 5 6 7 8 9:=
7 1 9999 3 4 5 9 2 15 2 7
8 2 3 9999 6 3 13 12 15 5 2
9 3 4 6 9999 7 6 13 6 8 3
10 4 5 3 7 9999 7 7 1 6 11
11 5 9 13 6 7 9999 5 9 7 4
12 6 2 12 13 7 5 9999 3 6 8
13 7 15 15 6 1 9 3 9999 3 5
14 8 2 5 8 6 7 6 3 9999 14
15 9 7 2 3 11 4 8 5 14 9999;
16
```



**APÊNDICE J – Arquivo “model\_truck3.mod” em AMPL do modelo PCV-D**

```
1 param n := 10;
2 param Nop := 5;
3 param Nt := 5;
4 param alpha := 0.5;
5 param tmax := 20;
6
7 set v := 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10;
8
9 param cvw :
10   1 2 3 4 5 6 7 8 9 10:=
11 1  9999 3 4 5 9 2 15 2 7 4
12 2  3 9999 6 3 13 12 15 5 2 6
13 3  4 6 9999 7 6 13 6 8  3 14
14 4  5 3 7 9999 7 7 1 6  11 3
15 5  9 13 6 7 9999 5 9 7  4 7
16 6  2 12 13 7 5 9999 3 6 8 9
17 7  15 15 6 1 9 3 9999 3 5 5
18 8  2  5  8 6 7 6 3 9999 14 12
19 9  7  2 3 11 4 8 5 14  9999 10
20 10 4 6 14 3 7 9 5 12 10 9999;
21
```

## ANEXO A – Fluxograma PRISMA 2020



\*Consider, if feasible to do so, reporting the number of records identified from each database or register searched (rather than the total number across all databases/register)

†If automation tools were used, indicate how many records were excluded by a human and how many were excluded by automation tools