

José Pedro Gomes da Cruz

**Sistema de apoio à decisão para projeto de rede
logística de *e-commerce*: aplicação do problema de
roteirização de veículos capacitados em duas camadas
(2E-CVRP)**

São Paulo
2024

José Pedro Gomes da Cruz

**Sistema de apoio à decisão para projeto de rede
logística de *e-commerce*: aplicação do problema de
roteirização de veículos capacitados em duas camadas
(2E-CVRP)**

Versão Corrigida

Dissertação apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:

Engenharia de Produção

Orientador:

Prof. Dr. Hugo Tsugunobu Yoshida
Yoshizaki

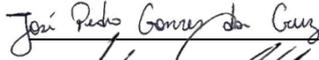
São Paulo
2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

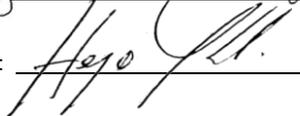
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 24 de abril de 2024.

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

Cruz, José Pedro Gomes da

Sistema de apoio à decisão para projeto de rede logística de e-commerce: aplicação do problema de roteirização de veículos capacitados em duas camadas (2E-CVRP) / J. P. G. Cruz -- versão corr. -- São Paulo, 2024.
102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.E-commerce 2.2E-CVRP 3.Satélites de distribuição urbana
4.Treinamento de Profissionais 5.Sistema de Apoio à Decisão (DSS)
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão pelo apoio, incentivo e orientação fundamentais proporcionados pelo Prof. Dr. Hugo Yoshizaki durante todo o desenvolvimento da minha dissertação. Sua expertise e dedicação foram cruciais para o êxito deste trabalho, e por isso, estendo-lhe meu mais profundo agradecimento.

Além disso, quero estender meus agradecimentos à minha querida família e a todos os colegas do CISLOG (USP). O apoio incondicional de vocês foi fundamental para superar desafios e garantir que este trabalho fosse concluído da melhor forma possível. Em particular, expresso minha gratidão à Fabiana Rivas, que desempenhou um papel crucial ao manter o fluxo de trabalho e atender às necessidades de forma incansável.

É com imensa satisfação que reconheço o suporte financeiro fornecido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). O respaldo dessa instituição foi essencial para viabilizar a realização deste projeto de pesquisa.

Agradeço novamente a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para o sucesso desta dissertação. Cada gesto de apoio e encorajamento foi fundamental para alcançarmos este resultado. Estou profundamente grato por fazer parte de uma comunidade acadêmica tão colaborativa e dedicada.

RESUMO

CRUZ, J. P. G. **Sistema de apoio à decisão para projeto de rede logística de e-commerce**: aplicação do problema de roteirização de veículos capacitados em duas camadas (2E-CVRP). 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

O rápido crescimento do *E-commerce* transformou significativamente a dinâmica da rede de distribuição logística, em especial, pelo aumento de pedidos pequenos e expressos e da grande concentração de entregas em áreas urbanas, impactando diretamente desafios na logística em grandes centros urbanos, como tráfego intenso e congestionamento. Em resposta, surge o Problema de Roteamento de Veículos Capacitados em Duas Camadas (2E-CVRP), dividindo a distribuição em dois níveis com veículos especializados em transporte de carga em áreas urbanas e em zonas mais amplas, por intermédio do uso de Pontos de Transbordo Urbano (UTPs), ou satélites de distribuição urbana, que facilitam a consolidação e transferência de mercadorias até a entrega ao consumidor final. Porém, apesar dos benefícios, o 2E-CVRP demanda decisões especializadas, possibilitada pelo ensino e treinamento de profissionais e alunos por meio de Sistemas de Apoio à Decisão (DSS), que forneçam soluções rápidas e eficientes para o problema. Por conta disso, o objetivo deste trabalho é desenvolver um DSS interativo que capacite os tomadores de decisão a avaliar estrategicamente os melhores locais para estabelecer satélites de distribuição, determinar frotas eficientes e otimizar as entregas, considerando as nuances do 2E-CVRP no contexto específico do comércio eletrônico. O sistema proposto não apenas analisa o perfil das entregas, mas também permite a rápida avaliação de combinações de locais e frotas, auxiliando na análise de desempenho e preferências das alternativas de decisão. Adicionalmente, o trabalho visa desenvolver uma heurística eficiente, baseada em busca local, que forneça resultados satisfatórios em um curto espaço de tempo computacional para uso no sistema. A avaliação da heurística foi realizada com *Benchmarking* de instâncias da literatura, e resultou em um *gap* médio de 7,4% e um tempo médio de 9,26 segundos. Quanto ao sistema, ao fim do desenvolvimento, o teste piloto de usabilidade empregado com alunos e profissionais em logística demonstra-se útil para treinamentos, visto *feedbacks* positivos vindo dos participantes sobre a melhoria de suas decisões, guiadas pelas análises de resultados e apoiadas pelos recursos fornecidos pelo sistema. Com isso, o trabalho contribuiu na oferta de uma ferramenta eficaz para treinamento e tomada de decisões estratégicas na logística de comércio eletrônico, considerando a complexidade e as demandas contemporâneas desse cenário.

Palavras-Chave – *E-commerce*; 2E-CVRP; Satélites de distribuição urbana; Treinamento de Profissionais; Sistema de Apoio à Decisão (DSS).

ABSTRACT

CRUZ, J. P. G. **Decision support system for e-commerce logistics network project:** application of the two-echelon capable vehicle routing problem (2E-CVRP). 2024. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024.

The rapid growth of e-commerce has significantly transformed the dynamics of the logistics distribution network, particularly due to the increase in small and express orders and the large concentration of deliveries in urban areas. This directly impacts challenges in logistics, especially in large urban centers, such as heavy traffic and congestion. In response, the Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem (2E-CVRP) emerges, dividing distribution into two levels with vehicles specialized in cargo transport in urban areas and broader zones, through the use of Urban Transshipment Points (UTPs), or urban distribution satellites, which streamline the consolidation and transfer of goods until reaching the final consumer. However, despite the benefits, 2E-CVRP requires specialized decisions, facilitated by the education and training of professionals and students through Decision Support Systems (DSS) that provide quick and efficient solutions to the problem. Therefore, the objective of this research is to develop an interactive DSS that enables decision-makers to strategically evaluate the best locations to establish distribution satellites, determine efficient fleets, and optimize deliveries, considering the nuances of 2E-CVRP in the specific context of e-commerce. The proposed system not only analyzes the delivery profile but also allows for the rapid evaluation of combinations of locations and fleets, assisting in the performance analysis and preferences of decision alternatives. Additionally, the work aims to develop an efficient heuristic, based on local search, that provides satisfactory results in a short computational time for use in the system. The heuristic was evaluated through benchmarking instances from the literature, resulting in an average gap of 7.4% and an average time of 9.26 seconds. Regarding the system, at the end of development, the pilot usability test conducted with students and logistics professionals proves useful for training. Positive feedback from participants indicates improvement in their decision-making guided by result analyses and supported by the system's resources. Thus, the research contributes by providing an effective tool for training and making strategic decisions in e-commerce logistics, considering the complexity and contemporary demands of this scenario.

Keywords – E-commerce; 2E-CVRP; Urban Distribution Satellites; Training of professionals; Decision Support Systems (DSS).

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Exemplo ilustrativo de uma rota no 2E-CVRP | 13 |
| 2 | Operador de Crossolver Baseado em Ordem | 35 |
| 3 | Operador de Crossolver de Cópia de Rota | 36 |
| 4 | Operador de Crossolver Baseado em Ciclo | 36 |
| 5 | Operador de Crossolver Parcialmente mapeado | 37 |
| 6 | Fluxo de Processo de Desenvolvimento do DSS | 42 |
| 7 | Diagrama do Fluxo do desenvolvimento do DSS | 46 |
| 8 | Mapa de distribuição de Remessas em São Paulo | 52 |
| 9 | Mapa de Calor da distribuição de Remessas em São Paulo | 52 |
| 10 | Mapa de Calor da distribuição de Peso por Remessas em São Paulo | 53 |
| 11 | Histograma da quantidade de pacotes por remessa | 54 |
| 12 | Histograma do peso (kg) por remessa | 54 |
| 13 | Histograma da quantidade de Pacotes por Endereço | 56 |
| 14 | Histograma do peso (kg) por Endereço | 56 |
| 15 | Veículo da FE Volkswagen Delivery 9.170 | 57 |
| 16 | Veículo da SE Bicicletas com assistência elétrica Rappi | 57 |
| 17 | Veículo da SE Triciclo Elétrico MedEBike | 58 |
| 18 | Veículo da SE Sprinter Van 516 Standard TA | 59 |
| 19 | Pseudocódigo Heurística Construtiva | 63 |
| 20 | Pseudocódigo Heurística Busca Local | 65 |
| 21 | Pseudocódigo Heurística Troca 1 por 1 | 66 |
| 22 | Pseudocódigo Heurística Troca 2 por 2 | 67 |
| 23 | Pseudocódigo Heurística Troca 3 rotas | 68 |

| | | |
|----|---|----|
| 24 | Pseudocódigo Heurística avaliar Troca 3 rotas | 69 |
| 25 | Histograma de <i>gap</i> da Heurística | 69 |
| 26 | Histograma do tempo de execução da Heurística | 70 |
| 27 | Histograma de <i>gap</i> da Heurística frente literatura | 70 |
| 28 | Histograma de Tempo de Execução de Heurística da literatura | 70 |
| 29 | Tela Principal com créditos aos desenvolvedores | 75 |
| 30 | Tela de Preparação do DSS | 75 |
| 31 | Tela de Preparação do DSS - seção (b.1), (b.2), (b.3) e (b.4) | 76 |
| 32 | Tela de Preparação do DSS - seção (b.6) | 76 |
| 33 | Tela de Roteamento do DSS | 77 |
| 34 | Tela de Roteamento do DSS - seção b | 78 |
| 35 | Tela de Sistema Após término de um Participante | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|---|--|----|
| 1 | Estatística Descritiva de Remessas | 55 |
| 2 | Estatística Descritiva de Remessas Por Endereço | 55 |
| 3 | Tabela de Características de veículos Usados no DSS | 59 |
| 4 | Resultado numéricos da heurística | 71 |
| 5 | Resultado do questionário do teste piloto de usabilidade para cada frase . . | 80 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1 | Contextualização | 12 |
| 1.2 | Problema | 13 |
| 1.3 | Objetivos da pesquisa | 14 |
| 1.4 | Justificativa | 15 |
| 1.5 | Delimitação do estudo | 16 |
| 1.6 | Estruturação do trabalho | 17 |
| 2 | REVISÃO DA LITERATURA | 18 |
| 2.1 | O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados em Duas Camadas . | 18 |
| 2.1.1 | Descrição do Problema | 18 |
| 2.1.2 | Formulação Baseada em Arcos | 19 |
| 2.1.3 | Formulação Baseada em Rotas | 22 |
| 2.2 | Estratégias de Solução | 24 |
| 2.2.1 | Algoritmos exatos para 2E-CVRPs | 25 |
| 2.2.1.1 | Algoritmos branch-and-cut para o 2E-CVRP | 25 |
| 2.2.1.2 | Algoritmos baseados em decomposição para o 2E-CVRP . | 27 |
| 2.2.2 | Heurísticas para 2E-CVRPs | 28 |
| 2.2.2.1 | Heurísticas Construtivas | 28 |
| 2.2.2.2 | Busca Local | 30 |
| 2.2.2.3 | <i>Path relinking</i> | 32 |
| 2.2.2.4 | Algoritmos Genéticos | 33 |
| 2.3 | Sistema de Apoio a Decisão | 37 |
| 2.3.1 | Benefícios de uso dos DSSs | 38 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.3.2 | Aplicações práticas dos DSSs | 39 |
| 2.3.3 | Aplicação de DSSs em Problemas de <i>Last Mile</i> e VRPs | 39 |
| 2.3.4 | Etapas e Noções para o desenvolvimento do DSS | 40 |
| 2.3.5 | Características importantes de um DSS em um sistema logístico de last mile | 43 |
| 3 | METODOLOGIA | 45 |
| 3.1 | Etapas do Desenvolvimento do DSS | 45 |
| 3.1.1 | Levantamento de requisitos, casos especiais e parâmetros do problema | 45 |
| 3.1.2 | Estrutura do modelo, banco de dados e tarefas | 47 |
| 3.1.3 | Geração inicial do modelo e avaliação de resultados | 48 |
| 3.1.4 | Desenvolvimento, Testes e Comportamento do decisor | 48 |
| 4 | DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA | 50 |
| 4.1 | Contexto do DSS | 50 |
| 4.2 | Estudo de Caso | 51 |
| 4.2.1 | Dados de Entrega | 51 |
| 4.2.2 | Veículos considerados na Ferramenta | 55 |
| 4.3 | Modelagem Matemática Para o Problema 2E-CVRP Aplicado a entrega de E-commerce | 59 |
| 4.4 | Heurística e seu desempenho | 62 |
| 4.4.1 | Descrição da heurística | 62 |
| 4.4.2 | Desempenho da heurística | 64 |
| 5 | O SISTEMA DE APOIO À DECISÃO | 72 |
| 5.1 | Protótipo do DSS | 72 |
| 5.1.1 | Banco de Dados | 72 |
| 5.1.2 | APIs utilizadas | 73 |
| 5.1.2.1 | API Leaflet-Route_Machine do OpenStreetMap | 73 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.1.2.2 | API de Roteirização | 73 |
| 5.1.3 | Interfaces | 74 |
| 5.1.3.1 | Interface de Créditos | 74 |
| 5.1.3.2 | Interface de Preparação | 74 |
| 5.1.3.3 | Interface de Roteamento | 77 |
| 5.2 | Teste Piloto de Usabilidade | 79 |
| 5.2.1 | Resultados do Teste de Usabilidade | 79 |
| 5.2.2 | Discussões do Teste de Usabilidade | 82 |
| 6 | Conclusões | 84 |
| | Referências | 86 |
| | Apêndice A – Script Teste de Usabilidade | 97 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

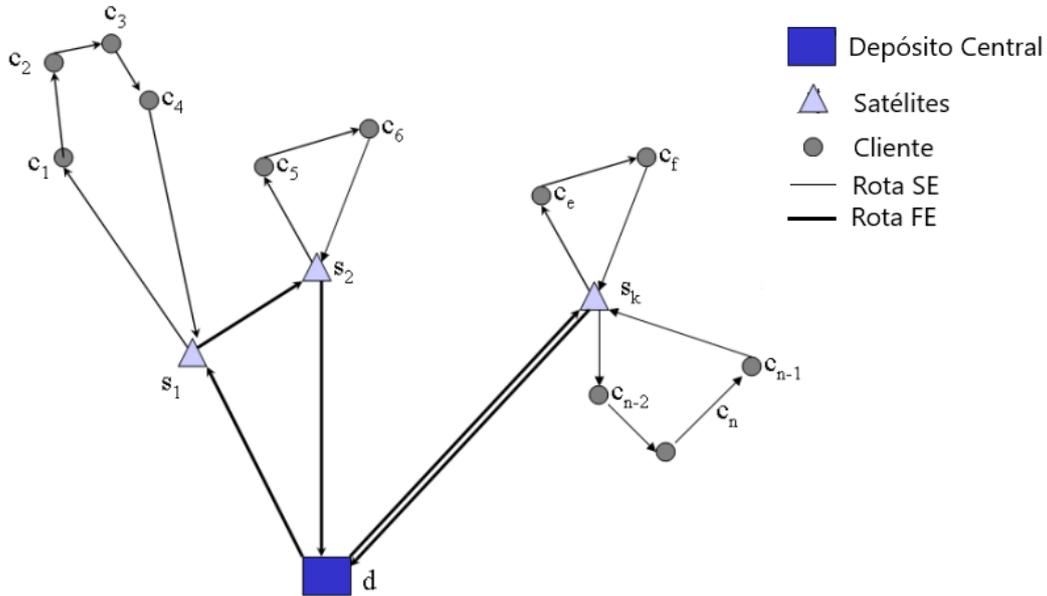
O volume de entregas de *e-commerce*, segundo Statista (2020), tem tido grandes aumentos nos últimos anos, tendo alcançado a marca de 4,9 trilhões de dólares americanos em comercialização de produtos em plataformas digitais durante o ano de 2020, alterando exponencialmente a dinâmica da rede de distribuição logística visto a também mudança nos perfis de entrega.

Dentre essas mudanças, Snoeck e Winkenbach (2020), Janjevic, Winkenbach e Merchán (2019) e Iwan et al. (2021) apontam o aumento do número de encomendas pequenas e expressas, a grande concentração de entregas em áreas urbanas, a necessidade de se adaptar às mudanças sazonais no volume de encomendas, como durante as épocas de presentes, o crescimento da demanda por entregas durante horários fora do expediente comercial, a expectativa dos clientes por entregas rápidas e personalizadas, além do aumento da preocupação com questões de sustentabilidade, como a minimização do impacto ambiental das entregas.

Esta mudança de perfil representa aumento nos desafios para entregas, em especial em grandes centros urbanos, segundo Taniguchi (2014), por intensivar problemas da logística urbana, tais como o tráfego intenso e congestionamento, o que pode levar a atrasos e dificuldades na entrega de mercadorias; o estacionamento limitado que dificulta encontrar um lugar para estacionar e descarregar mercadorias em áreas urbanas densamente povoadas; e os regulamentos de zonas que restringem o uso de veículos comerciais, além de outros, como infraestrutura de transporte inadequada e riscos de fraude e roubo.

Para maximizar a eficiência e atender a essas limitações houve a concepção do problema de roteirização de veículos capacitados em duas camadas (2E-CVRP) com a contribuição de Crainic et al. (2008) que argumentou sobre os benefícios de dividir a rede de distribuição em dois níveis ou duas camadas. Cada uma delas deve utilizar diferentes tipos de veículos que Guastaroba, Speranza e Vigo (2016) chamam de veículos cargueiros e urbanos, para coleta e entrega no depósito e nos clientes, respectivamente, em que instalações intermediárias facilitam a consolidação e transferência de mercadorias entre

Figura 1: Exemplo ilustrativo de uma rota no 2E-CVRP



Fonte: Adaptado de Perboli, Tadei e Masoero (2009)

esses diferentes tipos de veículos, como pontos de transbordo urbano, do inglês *urban transshipment points* (UTPs), também nomeado de satélites de distribuição.

Nas duas camadas do 2E-CVRP, Perboli, Tadei e Masoero (2009) descrevem que pacotes são reunidos em um grande centro de distribuição, fora da zona urbana, levados por grandes veículos para os satélites, dentro da zona urbana, para então realizar entregas aos clientes em veículos de maior eficácia em centros urbanos, sendo as rotas entre depósito e satélites nomeados de primeira camada (FE) e as rotas entre satélites e clientes finais nomeada de segunda camada (SE). A Figura 1 contém um exemplo ilustrativo de rotas do problema.

1.2 Problema

Uma questão que surge neste problema é sua grande complexidade computacional para resolver o problema de forma eficiente, conforme Jie et al. (2019), além disso, Perboli e Rosano (2018) colocam que treinar gerentes para lidar com decisões complexas de forma ágil e dinâmica é uma tarefa realizável especialmente com uso de sistemas de apoio a decisão (DSS) que indique boas soluções de rotas rapidamente, tendendo ao instantâneo ou, para Santos (2021), ao tempo máximo de trinta segundos para treinamentos individuais e um minuto para treinamento em grupos, em que as pessoas necessitam conversar sobre cenários e não se importam em deixar o programa executando enquanto planejam

novas alternativas.

Além disso, uma outra característica do problema é a premissa de pacotes de pesos homogêneos, que formam uma demanda heterogênea nos clientes, porém na logística de *e-commerce*, os pacotes que formam uma remessa de um cliente são heterogêneos (SNOECK; WINKENBACH, 2020), por conta disso, o algoritmo de resolução do 2E-CVRP em um DSS precisa ser capaz de avaliar o peso total das remessas no processo de roteirização também.

1.3 Objetivos da pesquisa

O Objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de apoio a decisão com fins de servir como uma ferramenta para treinamentos e que possibilite ao tomador de decisão avaliar melhores locais para estabelecer satélites/UTPs, suas respectivas frotas e tamanhos de frota para otimizar as entregas dentro do Problema de Roteamento de Veículos Capacitados em Duas Camadas (2E-CVRP) para ser utilizado em um contexto de treinamento e ensino de estudantes e profissionais em logística no planejamento de rede logística de entrega de *e-commerce*.

Para tanto, os objetivos específicos do trabalho visão atingir os seguintes requisitos:

- O sistema deve auxiliar o tomador de decisão a avaliar o perfil de entregas a serem realizadas por região; além das características destas regiões que influenciam no processo de decisão, tais como a demanda dos clientes nelas, distâncias reais e tempos de viagens dos veículos;
- O sistema deve permitir que o tomador de decisão avalie rapidamente possíveis combinações de locais e frotas, para serem suas alternativas de decisão;
- O sistema deve auxiliar o tomador de decisão a avaliar o desempenho das alternativas de decisão e estabelecer sua preferência; e
- O sistema deve operar com uma heurística capaz de alcançar bons resultados em pouco tempo computacional para que possa ser utilizado no sistema, visto a complexidade do problema e a necessidade de agilidade do mesmo para uso em treinamentos

1.4 Justificativa

Sistemas de Apoio à Decisão são ótimos auxiliares que permitem análises visuais de problemas e possibilita melhoria no processo de tomada de decisão (CIPTAYANI; DEWI, 2018), sendo assim uma ótima ferramenta de trabalho e treinamentos (MAZZUTO et al., 2018). Algumas aplicações DSS, como a de Perboli e Rosano (2018) visam ajudar os tomadores de decisão de logística a otimizar a roteirização de entregas, gestão de frotas, planejamento e o despacho de rotas, bem como facilitar o compartilhamento eficiente de informações para avaliar transportes colaborativos na entrega de produtos utilizando vans e veículos ecológicos, como bicicletas, no problema de roteamento de veículos capacitados de uma única camada dentro de zonas urbanas.

Desse modo, os DSSs podem ser aplicados para otimizar o processo de *Last Mile*, garantindo uma entrega mais eficiente e satisfatória para o cliente. Uma das aplicações mais comuns é a utilização de algoritmos de roteamento para otimizar as rotas de entrega, levando em consideração fatores como a distância entre os pontos de entrega, o tempo de deslocamento, o volume de entregas e tipo de frota de veículos disponível (FIKAR; HIRSCH; GRONALT, 2018).

Neste contexto, o problema de uma rede em dois níveis tem uma aplicação crucial no contexto da logística urbana, como afirmam Neghabadi, Samuel e Espinouse (2018), e podem ser inseridos como objeto de análise em um DSS. Nele, o desafio é encontrar soluções eficientes e eficazes para transportar mercadorias em áreas urbanas densamente povoadas, levando em consideração as preocupações relacionadas à segurança e ao meio ambiente. Empresas de logística urbana enfrentam diversos desafios, como salientado por Savelsbergh e Woensel (2016), em que as estradas e ruas são muitas vezes congestionadas, tornando difícil a movimentação de veículos grandes. Além disso, as entregas precisam ser feitas dentro de um prazo muito limitado, o que requer rotas otimizadas que minimizem o tempo de viagem, como apontado por Crainic, Gendreau e Gendron (2021). Por conseguinte, a redução das emissões de gases de efeito estufa é também uma preocupação crescente, uma vez que é importante ajudar a mitigar as mudanças climáticas (LURKIN; HAMBUCKERS; WOENSEL, 2021).

Dessa forma, Taniguchi (2014) destaca que o problema de uma rede em dois níveis pode ser aplicado na busca de soluções de transporte mais eficientes e sustentáveis. Anderlüh, Hemmelmayr e Nolz (2016) e Enthoven et al. (2020) ressaltam que é possível otimizar as rotas de entrega e reduzir o tamanho dos veículos e suas emissões de poluentes, utilizando veículos elétricos ou bicicletas de carga como uma alternativa mais sustentável e

eficiente para a entrega de mercadorias em áreas urbanas. Assim, a aplicação do problema de uma rede em dois níveis é uma ferramenta crucial para melhorar a logística urbana e garantir entregas mais rápidas, seguras e sustentáveis.

Diante desse contexto, com a implementação crescente de zonas de emissão zero ou de baixa emissão em diversas cidades, tornou-se cada vez mais premente a busca por oportunidades de consolidação na logística urbana, o que reforça a importância de encontrar e coordenar soluções eficientes e sustentáveis para o transporte de cargas (LURKIN; HAMBUCKERS; WOENSEL, 2021).

Uma estratégia comum para lidar com essa questão é a consolidação do volume fora da cidade usando centros de distribuição urbanos. Nessa estratégia, a carga é transportada para as áreas metropolitanas mais densas usando grandes veículos. Adicionalmente, alarga-se a rede de distribuição urbana acrescentando um conjunto de satélites mais próxima das zonas centrais da cidade, melhorando a eficiência tanto a montante (dos grandes armazéns) quanto a jusante (ao nível dos diversos clientes), finalizando a entrega em veículos menores e trafegáveis nestas zonas, tais como bicicletas elétricas (SAVELSBERGH; WOENSEL, 2016).

Outros exemplos de redes de distribuição de dois níveis surgem em aplicações como entrega expressa, distribuição de produtos de mercearia e supermercados, transporte multimodal de cargas, *e-commerce* e serviços de entrega em domicílio (BELGIN; KARAOGLAN; ALTIPARMAK, 2018; PERBOLI; TADEI; VIGO, 2011).

1.5 Delimitação do estudo

Este trabalho se limita ao problema do 2E-CVRP aplicado à logística de *e-commerce*. Nesta limitação, as demandas dos clientes são determinísticas e as entregas são realizadas e finalizadas em uma única tentativa, considerando-se zero a chance de falhas de entrega. Além disso, as limitações físicas da entrega consideradas são limite de distâncias que alguns tipos de veículos podem possuir, por exemplo bicicletas, e o limite de tempo de trabalho dos veículos, assumindo que o veículo é manuseado por único time de motorista e ajudante, caso necessite, logo a jornada de trabalho da equipe é o tempo máximo de utilização dos veículos.

As distâncias e tempos de viagens percorridos entre clientes, satélites e depósito são os estimados via *API do Open Street Maps* que fornece dados e estimativas baseados em movimentações de pessoas em veículos em seu dia a dia.

1.6 Estruturação do trabalho

A estrutura do trabalho consiste na revisão da literatura na seção 2 sobre as principais abordagens de solução para o 2E-CVRP para darem fundamento para o desenvolvimento da heurística a ser utilizada neste trabalho, além de fazer uma breve apresentação sobre aplicações de DSSs em problemas de logística e *last mile*. A seção 3 apresenta as etapas a serem seguidas durante o desenvolvimento do DSS, além da heurística a ser implementada para resolver o problema. As seções 4 e 5 apresentam os dados a serem usados no sistema, a estrutura do problema abordado e a heurística usada para resolver o problema, bem como os resultados de testes de usabilidade do sistema. Por fim, a seção 6 apresenta as conclusões gerais dos resultados obtidos e indicações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo serão apresentadas três seções. Na primeira seção: "O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados em Duas Camadas", há a descrição geral do problema de roteamento de veículos capacitados em duas camadas, bem como suas principais modelagens matemáticas. Na segunda seção: "Estratégias de Solução", as principais estratégias de solução para o problema são apresentadas. Por fim, a terceira seção: "Sistemas de Apoio a Decisão", apresenta algumas aplicações de sistemas de apoio a decisão em logística e *last mile*, bem como as principais etapas e pontos importantes para seu desenvolvimento.

2.1 O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados em Duas Camadas

Esta seção apresenta a descrição geral do problema, bem como as principais formulações matemáticas que inspiram as estratégias de solução para o 2E-CVRP.

2.1.1 Descrição do Problema

A descrição formal do problema capacitado de roteamento de veículos em duas camadas consiste em um grafo direto $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$ em que o conjunto de vértices $\mathcal{V} = 0 \cup \mathcal{S} \cup \mathcal{C}$ consiste na união do conjunto do depósito central 0 , do conjunto de Satélites \mathcal{S} e do conjunto de Clientes \mathcal{C} . Nesta definição, os produtos que estão alocados no depósito central são transportados por uma frota de veículos cargueiros homogêneos para os satélites que, por sua vez, realizam a entrega final do produto nos clientes com uma frota de veículos homogêneos menores.

Já os vértices $\mathcal{A} = A_1 \cup A_2$ são formado pela união dos conjuntos de arcos da primeira camada (FE) do problema $A_1 = \{(i, j) | i, j \in \{0\} \cup \mathcal{S}, i \neq j\}$, contendo as ligações entre o depósito central e os satélites, com os arcos da segunda camada (SE) $A_2 = \{(i, j) | i, j \in \mathcal{S} \cup \mathcal{C}, i \neq j\} \cup \{(i, j) | i, j \in \mathcal{S}\}$.

Além disso, os veículos usados na primeira (FE) e segunda camada (SE) possuem

capacidade de transporte Q_1 e Q_2 , existindo uma quantidade de viagens m_s que o conjunto veículos em cada satélite podem realizar. Também no problema, os clientes são heterogêneos, cada um contendo sua respectiva demanda d_i que precisa ser atendida integralmente por um mesmo veículo, logo $d_i \leq Q_2, \forall i \in \mathcal{C}$. O objetivo do problema é minimizar o custo de transporte e manutenção dos estoques armazenados no satélite. A Figura 1 contem um exemplo ilustrativo de rotas do problema.

A primeira formulação matemática do problema foi apresentada por Gonzalez-Feliu et al. (2008) como um modelo de programação inteira, porém este modelo possui falhas que impedem a solução de qualquer problema com mais que dois satélites, como observado por Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) que apresentam uma modelagem mais eficiente para o problema baseado na descrição do problema com arcos.

Além desta modelagem, denominada formulação baseada em arcos ou *arc-based formulation*, uma segunda proposta foi realizada por Baldacci et al. (2013), denominada como formulação baseada em rotas ou *routed-based formulation*, em que se considera um conjunto de rotas R_1 e R_2 , contendo as melhores combinações de rotas na primeira e segunda camada do problema, e o objetivo é identificar as melhores combinações que minimizam o custo de transporte e manutenção de estoque do problema.

2.1.2 Formulação Baseada em Arcos

A formulação baseada em arcos, assim como na descrição do problema, é baseada em um grafo direto $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{A})$, em que um veículo deve utilizar os arcos para passar uma vez em cada vértice de cliente, seguindo um roteiro que parte e retorna à um satélite, obedecendo as limitações do veículo. A formulação descrita por Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) considera o seguinte:

Conjuntos do problema

- \mathcal{S} : Conjunto de satélite
- \mathcal{C} : Conjunto de Clientes
- K_1 : Conjunto de veículos que compõe a FE
- A_1, A_2 : Conjunto de Arcos da FE e SE

Índices

- i, j : índices que representam depósito, satélite ou cliente com $i, j \in \mathcal{A}$.
- s : índice de satélite $s \in \mathcal{S}$
- k : índice que representa um veículo com $k \in K_1$

Parâmetros

- Q_1, Q_2 : Capacidade dos veículos que compõem a FE e SE
- d_i : Demanda do cliente i
- m_s : Quantidade máxima de viagens que a frota de veículos do satélite s pode executar
- h_s : Custo de manutenção de um item em estoque no satélite s
- c_{ij} : custo de transporte de veículo por percorrer arco (i, j)

Variáveis de decisão

- x_{ijk} : Variável de rota igual a 1 se o arco $(i, j) \in A_1$ é percorrido pelo veículo $k \in K_1$, 0 caso contrário.
- u_{sk} : Posição de atendimento do satélite $s \in \mathcal{S}$ na rota do veículo $k \in K_1$.
- w_{sk} : Carregamento entregue no satélite $s \in \mathcal{S}$ na rota do veículo $k \in K_1$.
- y_{ijk} : Variável de rota igual a 1 se o arco $(i, j) \in A_2$ é percorrido por uma rota partindo do satélite $s \in \mathcal{S}$, 0 caso contrário.
- f_{ijk} : Variável de fluxo de carregamento entre arcos $(i, j) \in A_2$ atendidos pelo satélite $s \in \mathcal{S}$.

O modelo matemático é dado por

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in K_1} \sum_{(i,j) \in A_1} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} c_{ij} y_{ijs} + \sum_{k \in K_1} \sum_{s \in \mathcal{S}} h_s w_{sk} \quad (2.1)$$

sujeito à

$$\sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk} = \sum_{(j,i) \in A_1} x_{jik}, \quad i \in \{0\} \cup \mathcal{S}, k \in K_1 \quad (2.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk} \leq 1, \quad i \in \{0\} \cup \mathcal{S}, k \in K_1 \quad (2.3)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + |\mathcal{S}|x_{ijk} \leq |\mathcal{S}| - 1, \quad i, j \in \mathcal{S}, i \neq j, k \in K_1 \quad (2.4)$$

$$w_{sk} \leq Q_1 \sum_{(j,s) \in A_1} x_{jsk}, \quad s \in \mathcal{S}, k \in K_1 \quad (2.5)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} w_{sk} \leq Q_1, \quad k \in K_1 \quad (2.6)$$

$$\sum_{k \in K_1} w_{sk} = \sum_{(j,s) \in A_2} f_{sjs}, \quad s \in \mathcal{S} \quad (2.7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_2} y_{ijs} = \sum_{(j,i) \in A_2} y_{jis}, \quad s \in \mathcal{S} \quad (2.8)$$

$$\sum_{(s,j) \in A_2} y_{sjs} \leq m_s, \quad s \in \mathcal{S} \quad (2.9)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} y_{ijs} = 1, \quad j \in \mathcal{C} \quad (2.10)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(j,i) \in A_2} f_{jis} - \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} f_{ijs} = d_i, \quad j \in \mathcal{C} \quad (2.11)$$

$$f_{ijs} \leq Q_2 y_{ijs}, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (2.12)$$

$$f_{ijs} \geq 0, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (2.13)$$

$$y_{ijs} \in \mathbb{B}, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (2.14)$$

$$x_{ijl} \in \mathbb{B}, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (2.15)$$

$$w_{sk} \geq 0, \quad k \in K_1, s \in \mathcal{S} \quad (2.16)$$

$$u_{sk} \in \mathbb{Z}^+, \quad k \in K_1, s \in \mathcal{S} \quad (2.17)$$

A função objetivo (2.1) tem como objetivo minimizar os custos totais relacionados ao roteamento e manuseio. As restrições numeradas de (2.2) a (2.6) se referem exclusivamente à primeira camada do problema. A Restrição (2.2) garante a conservação do fluxo para cada veículo de transferência de estoque na primeira camada em cada um dos satélites. A Restrição (2.3) impõe a restrição de que cada veículo na primeira camada deve visitar cada satélite no máximo uma única vez. A Restrição (2.4) evita a formação de sub-rotas, enquanto a Restrição (2.5) estabelece que o fluxo de depósito para o satélite s pertencente ao conjunto \mathcal{S} por meio do veículo k pertencente ao conjunto K_1 só pode ser positivo se o veículo k for utilizado. A Restrição (2.6) é responsável por impor as restrições de capacidade para os veículos FE.

As Restrições (2.7) têm a função de interligar o primeiro e o segundo nível do problema e estabelecer que o fluxo total do depósito para o satélite s deve ser igual à demanda total

atendida pelo mesmo.

As restrições numeradas de (2.8) a (2.12) modelam as rotas SE do problema. A Restrição (2.8) é responsável por garantir a conservação do fluxo em cada nó SE. As Restrições (2.9) limitam o número de veículos SE saindo de cada satélite, enquanto as Restrições (2.10) e (2.11) garantem que cada cliente seja visitado exatamente uma vez e que as demandas do cliente sejam atendidas. A Restrição (2.11) também proíbe a presença de sub-rotas, enquanto a Restrição (2.12) impõe as restrições de capacidade para os veículos SE.

Por fim, as Restrições (2.13) a (2.17) definem os domínios das variáveis.

2.1.3 Formulação Baseada em Rotas

A formulação baseada em rotas considera um conjunto de combinação de rotas viáveis que podem ser executadas na primeira (FE) e na segunda (SE) camada. O modelo foi proposto por Baldacci et al. (2013) e, apesar de ter uma convergência maior, tendo tempo computacional menor que o modelo baseado em arcos de Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013), conforme o autor, o tempo de *setup* da formulação é muito grande visto que, caso deseje-se alcançar o ótimo global do problema, seria necessário uma busca exaustiva de todas as combinações de rotas possível. Logo, o ponto chave desta formulação é elaboração de um algoritmo de *setup* rápido e certo que possa agilizar essa busca ignorando muitas combinações com baixo potencial.

Nesta formulação, considera-se conjuntos de rotas R_1 e R_2 viáveis que podem ser realizadas na FE e SE, respectivamente, em que o objetivo é identificar a combinação de rotas que minimiza o custo total da operação. Para tanto, cada rota da segunda camada está associada a um parâmetro a_{ir} igual a 1 se o cliente i está na rota r , 0 caso contrário. Da mesma forma, o custo da rota é dado pela equação 2.18 que é a soma dos custos dos arcos que formam a rota r e a carga a ser transportada na rota da SE é dada pela equação 2.19.

$$c_r = \sum_{(i,j) \in A(r)} C_{ij} \quad (2.18)$$

$$q_r = \sum_{i \in C} a_{ir} d_i \quad (2.19)$$

A formulação em si é dada da seguinte forma:

Conjuntos do problema

- \mathcal{S} : Conjunto de satélite
- \mathcal{C} : Conjunto de Clientes
- R_1, R_2 : Conjunto de Rotas viáveis da FE e SE

Índices

- i : índices que representam um cliente com $i \in \mathcal{C}$
- s : índice de satélite $s \in \mathcal{S}$
- r : índice que representa uma rota com $r \in R_1 \cup R_2$

Parâmetros

- Q_1 : Capacidade dos veículos que compõem a FE
- m_s : Quantidade máxima de viagens que a frota de veículos do satélite s pode executar
- h_s : Custo de manutenção de um item em estoque no satélite s
- c_r : custo de transporte de veículo por percorrer a rota $r \in R_1 \cup R_2$
- q_r : carga transportada na rota $r \in R_2$
- a_{ir} : Binária igual a 1 se o cliente i está na rota $r \in R_2$, 0 caso contrário

Variáveis de decisão

- x_r : Variável igual a 1 se rota $r \in R_1$ é percorrida, 0 caso contrário
- y_r : Variável igual a 1 se rota $r \in R_2$ é percorrida, 0 caso contrário
- f_{rs} : Variável de fluxo de carregamento na rota $r \in R_1$ para atender o satélite $s \in \mathcal{S}$

O modelo matemático é dado por

$$\text{Minimizar } \sum_{r \in R_1} c_r x_r + \sum_{r \in R_2} c_r y_r + \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{r \in R_1(s)} h_s f_{rs} \quad (2.20)$$

sujeito à

$$\sum_{r \in R_2} a_{ir} y_r = 1, \quad i \in C \quad (2.21)$$

$$\sum_{s \in S(r)} f_{rs} \leq Q_1 x_r, \quad r \in R_1 \quad (2.22)$$

$$\sum_{r \in R_1(s)} f_{rs} = \sum_{r \in R_2(s)} q_r y_r, \quad s \in S \quad (2.23)$$

$$\sum_{r \in R_1} x_r \leq |K_1|, \quad (2.24)$$

$$\sum_{r \in R_2} y_r \leq |K_2|, \quad (2.25)$$

$$\sum_{r \in R_2(s)} \leq m_s, \quad s \in S \quad (2.26)$$

$$f_{rs} \geq 0, \quad r \in R_1, s \in S(r) \quad (2.27)$$

$$x_r \in \mathbb{B}, \quad r \in R_1 \quad (2.28)$$

$$y_r \in \mathbb{B}, \quad r \in R_2 \quad (2.29)$$

A função objetivo minimiza os custos totais de manuseio e transporte de produtos na FE e SE. As restrições 2.21 impõem que a combinação de rotas selecionadas garanta que cada cliente seja visitado exatamente uma vez. As restrições 2.22 garantem que o fluxo do depósito para o satélite $s \in S$ na rota $r \in R_1$ só exista se a rota $r \in R_1$ for selecionada e, além disso, o restringe ao limite de capacidade dos veículos da FE.

As restrições 2.23 são as restrições de sincronização de carga entre a FE e a SE, impondo que o fluxo total entregue ao satélite $s \in S$ seja igual à demanda total do cliente atendida pelo satélite s . As restrições 2.24 e 2.25 garantem que o número de rotas selecionadas não exceda o número de veículos disponíveis. As restrições 2.26 limitam o número de rotas SE a partir de cada satélite. Por fim, as Restrições 2.27, 2.28 e 2.29 definem os domínios das variáveis.

2.2 Estratégias de Solução

Esta seção aborda as estratégias de solução para o 2E-CVRP subdivididas em abordagens Exatas e abordagens heurísticas.

2.2.1 Algoritmos exatos para 2E-CVRPs

As abordagens exatas para o problema formam a primeira geração de soluções, empregando algoritmos de *branch-and-cut* e métodos de decomposição. Esta geração é caracterizada por ser limitada à solução de pequenas instâncias, incapazes de processar problemas de escala real. A seguir são apresentadas as principais pesquisas nestes dois tipos de algoritmos.

2.2.1.1 Algoritmos branch-and-cut para o 2E-CVRP

O modelo de Gonzalez-Feliu et al. (2008) é base dos primeiros algoritmos exatos para o problema até a demonstração feita por Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) de que o modelo possui limitações que fazem destes algoritmos iniciais adequados apenas para instâncias de até dois satélites.

O primeiro algoritmo proposto é o método branch-and-cut do próprio Gonzalez-Feliu et al. (2008) em que se fortalece as relaxações do problema com a introdução de cortes derivados do Problema de Roteirização de Veículos (VRP) clássico, uma atribuída a variáveis das restrições de eliminação de sub-rotas e outra atribuída à redução de fluxos devido a clientes já atendidos, demonstradas nas equações 2.30 e 2.31, em que a restrição 2.31 pode ser inserida diretamente no modelo e a 2.30 dever ser inserida com A'_2 de cardinalidade limitada a 3, pois como demonstra o autor, cardinalidades maiores são inúteis neste modelo apresentado e podem ser substituídos por inspeção direta. Este método específico só é eficaz para resolver instâncias com até 22 clientes e dois satélites.

$$\sum_{(i,j) \in A'_2} y_{ijs} \leq |A'_2| - 1, \quad A'_2 \subset A_2, 2 \leq |A'_2| \leq |A_2| - 1 \quad (2.30)$$

$$f_{ijs} \leq (Q_2 - d_i)y_{ijs}, \quad \forall i, j \in \mathcal{C}, \forall s \in \mathcal{S} \quad (2.31)$$

$$f_{ijs} - \sum_{l \in \mathcal{S}} f_{jls} \leq (Q_2 - d_i)y_{ijs}, \quad \forall i, j \in \mathcal{C}, \forall s \in \mathcal{S} \quad (2.32)$$

Perboli, Tadei e Masoero (2010) apresentam em seu estudo novas desigualdades válidas, adaptando desigualdades do Problema de Roteirização de Veículos (VRP) clássico à formulação de dois níveis, baseados nos algoritmos de brach-and-cut para problema de roteirização de veículos capacitados (CVRP) propostos por Lysgaard, Letchford e Eglese (2004) e Letchford, Eglese e Lysgaard (2002), utilizando as inequações propostas por Perboli, Tadei e Vigo (2008) e Perboli, Tadei e Masoero (2009) como base. O algoritmo

aprimorado proposto pelos autores é capaz de resolver instâncias com até 32 clientes e dois satélites.

Posteriormente, Perboli, Tadei e Vigo (2011) melhoraram ainda mais o modelo original incorporando restrições de sub-rotas mais rígidas, derivadas considerando as atribuições cliente-veículo. Os autores relatam resultados comparáveis e destacam a eficácia das novas restrições na resolução de problemas de roteamento com dois níveis.

Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) foram os primeiros a introduzir um modelo e algoritmo branch-and-cut capaz de lidar com um número arbitrário de satélites no 2E-CVRP por adaptarem a formulação de fluxo de Gonzalez-Feliu et al. (2008) de maneira mais abrangente.

No entanto, como exemplificado por Archetti, Bianchessi e Speranza (2014), o algoritmo de *Branch-and-cut* é na verdade pautado no fato de que quando os clientes são atribuídos aos satélites, o problema se decompõe em uma roteirização de veículos de entrega dividida (SDVRP) na primeira camada do problema e em \mathcal{S} VRPs capacitados na segunda camada.

Para lidar com a complexidade do problema, Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) propõem um modelo relaxado que combina a formulação SDVRP relaxada de Belenguer, Martinez e Mota (2000) com um modelo para o problema de roteamento de localização de Contardo, Cordeau e Gendron (2013). Esse modelo relaxado reduz a simetria da formulação baseada em fluxo e melhora seu limite de relaxamento contínuo. No entanto, como esse modelo pode permitir soluções 2E-CVRP inviáveis, é necessário resolver um problema de viabilidade auxiliar para cada limite superior candidato.

Além disso, Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013) empregam o método de Lysgaard, Letchford e Eglese (2004) para separar várias famílias de desigualdades válidas, como reduções de capacidade arredondadas e enquadradas, multi-estrelas e desigualdades penteadas reforçadas. Um esquema de ramificação especial é ativado quando a solução para o modelo relaxado não é viável para o 2E-CVRP.

Os resultados obtidos pelo algoritmo mostram que ele é capaz de resolver efetivamente instâncias com até 50 clientes e cinco satélites, representando um avanço significativo no tratamento do problema 2E-CVRP com um número arbitrário de satélites até então.

Uma outra abordagem realizada para resolver o Problema é desenvolvida por Contardo, Hemmelmayr e Crainic (2012), comparando o problema com o de localização, considerando satélites fixos e sem limites de capacidades, que decompõe o problema em

dois níveis, realizando o processo de decisão de que satélites abrir, todavia seus resultados não são competitivos com outros autores, pois seu método é capaz de resolver problemas com até 50 clientes.

2.2.1.2 Algoritmos baseados em decomposição para o 2E-CVRP

Os métodos baseados em decomposição iniciam-se com o trabalho de Baldacci et al. (2013) que propõem um algoritmo customizado para resolver o modelo baseado em rota em que o método inicia enumerando todas as rotas $R1$ dominante entre o depósito central e os satélites, considerando instâncias de até 5 satélites, visto que mais satélites geram muitas combinações de rotas adicionais. A definição de rota dominante, também utilizado por Mhamedi et al. (2022), diz que uma rota domina uma segunda rota que possui o mesmo conjunto de satélites visitado com custo menor.

A segunda etapa do método de Baldacci et al. (2013) é realizada gerando um conjunto de soluções de segunda camada referida como uma configuração e consiste em um conjunto de rotas $R2$. Para cada configuração promissora, um limite máximo para o 2E-CVRP é calculado resolvendo um VRP multi-depósito (MDVRP) para o segundo escalão com o método de Baldacci e Mingozzi (2008), além de avaliar limite inferior e superior para descartar configurações que não podem levar a soluções ótimas, deixando apenas alguns MDVRPs para resolver a otimização. O método pode resolver instâncias 2E-CVRP com até 100 clientes e cinco satélites.

Outros métodos de decomposição utilizados posteriormente são resolvidos em conjunto com métodos de *branch-and-price-and-cut* (BP&C), como o trabalho de Santos, Mateus e Cunha (2015), feito para melhorar o método de Santos, Cunha e Mateus (2012), que empregou cortes de capacidade, porém seus resultados não são melhores que Baldacci et al. (2013) e não consegue resolver muitos problemas com mais que 50 clientes.

Neste ponto, o trabalho de Mhamedi et al. (2022) propõe, para etapa de busca de rotas da segunda camada, a utilização do método de BP&C proposto por Costa, Contardo e Desaulniers (2019) para particionar e resolver o problema, chegando a resolver instâncias de até 5 satélites e 100 clientes, além de conquistar soluções melhores que trabalhos anteriores, como os de Dellaert et al. (2019), que estabeleceu um conjunto de instâncias para o problema, porém ainda assim foi incapaz de resolver algumas delas.

O algoritmo BP&C mais recente e avançado para o 2E-CVRP é proposto por Marques et al. (2020) que especializa o algoritmo de Pessoa et al. (2020), que resolvem problemas de VRP de única camada, para o 2E-CVRP. Este algoritmo utiliza técnicas de relaxa-

mento *ng-route* de Baldacci, Mingozzi e Roberti (2011), cortes de nível 1 com memória limitada (*limited memory rank-1 cuts*) de (PECIN et al., 2016), enumeração de caminho (*path enumeration*) de Baldacci, Christofides e Mingozzi (2007) e *bucket graph labeling* de Sadykov, Uchoa e Pessoa (2021).

Marques et al. (2020) apresentam uma nova formulação baseada em rota com menos variáveis do que o modelo baseado em rota de Baldacci et al. (2013) e exponencialmente mais restrições, que podem ser separadas em tempo polinomial. Mesmo que o método enumera rotas FE (como todos os outros métodos de decomposição), a nova formulação permite, pelo menos em teoria, a geração dinâmica de variáveis FE. Duas novas famílias de desigualdades válidas, denominadas desigualdades de oferta de satélites (SSIs) e desigualdades de satélites visitados (VSIs), também são introduzidas, juntamente com um método heurístico para a separação de SSIs (os VSIs são separados por enumeração). Além disso, é aplicado um esquema de ramificação forte de sete critérios especificamente projetado para a configuração de dois níveis.

Marques et al. (2020) relatam soluções ótimas para todas as instâncias anteriores da literatura com até 200 clientes e dez satélites, e também soluções para novas instâncias de *benchmark* com até 300 clientes e 15 satélites.

2.2.2 Heurísticas para 2E-CVRPs

As principais estratégias heurísticas de solução do problema de 2E-CVP são baseadas em busca local, algoritmos genéticos e heurísticas de religação de caminhos ou *Path relinking*, visando gerar aproximações do ótimo para instâncias maiores ou mais complexas que as que os algoritmos exatos conseguem resolver. A seguir, algumas delas são apresentadas.

2.2.2.1 Heurísticas Construtivas

Este tipo de heurística é caracterizado por construir uma solução, factível ou não, baseado em alguma regra que incorpore a cada iteração um elemento à solução (ARENALLES et al., 2011). Todas as heurísticas para o 2E-CVRP têm em comum a estratégia de gerar uma solução inicial dividindo o problema em dois subproblemas separados, uma para a SE e uma para a FE, e resolver primeiramente o VRP relacionado à SE. Além disso, as heurísticas construtivas são empregadas exclusivamente na geração da solução inicial, sendo seguidas por uma segunda fase de aprimoramento.

Crainic et al. (2008) propõem dois métodos alternativos para resolver o problema de

roteamento da SE. Na primeira abordagem, primeiramente são formados *clusters* designando cada cliente ao satélite mais próximo, caso atingido limite de capacidade do satélite, os clientes são alocados no segundo mais próximo, e assim por diante. Em seguida, problemas CVRPs independentes são resolvidos para cada satélite com seus clientes atribuídos. Na segunda abordagem, um CVRP multi-depósito é resolvido, porém os autores não esclarecem se a resolução é feita com métodos heurísticos ou exatos. Após qualquer uma das abordagens, os autores resolvem a primeira camada como um VRP clássico, considerando a demanda acumulada nos satélites como pontos de entrega. Para teste da heurística, os autores utilizam as instâncias com 2 satélites e até 32 clientes de Gonzalez-Feliu et al. (2008) e comparam os resultados alcançando *GAPs* entre 0 e 7% em relação ao ótimo.

Já Crainic et al. (2011) trabalha sobre uma família de heurísticas Multi-Start baseadas na separação da transferência de depósito para satélite e da entrega via satélite para o cliente, resolvendo iterativamente os dois subproblemas de roteamento resultantes e ajustando as cargas de trabalho do satélite que os vinculam. Nelas uma solução inicial é feita somente formando *clusters* de clientes em seu respectivo satélite mais próximo, em sequência é realizada busca local nos *clusters* e calculando suas rotas.

Crainic et al. (2013) utilizam um método de busca aleatória gulosa adaptativa (GRASP) para alocar clientes aos satélites. O GRASP é definido pelo autor como uma técnica iterativa de amostragem aleatória usada para construir soluções iniciais. No estudo de Crainic et al. (2013), é calculada uma probabilidade de alocação para cada par de cliente e satélite com base em sua distância. Em seguida, um mecanismo de roleta é aplicado para associar cada cliente a um satélite de acordo com essas probabilidades. Essa abordagem permite a geração de várias soluções iniciais.

O método mais elementar é o baseado em vizinho mais próximo, o qual é utilizado por Belgin, Karaoglan e Altiparmak (2018) e consiste em um mecanismo simples. Basicamente, esse procedimento seleciona o cliente mais próximo de algum satélite, a partir do qual se inicia uma rota no satélite e se segue para este cliente, continuando a construção da rota com os clientes mais próximos do cliente anterior até que a capacidade total do veículo da SE seja atingida. Por fim, a rota é retornada ao satélite inicial. Após a conclusão da rota, o procedimento é repetido até que todos os clientes estejam roteados.

O método de inserção mais barata é empregado por Liu et al. (2016) a fim de rotear clientes em um satélite, onde cada satélite possui uma rota que começa e termina nele. Inicialmente, busca-se para cada rota qual cliente pode ser inserido com o menor custo possível, e a opção de menor custo é adicionada efetivamente na rota enquanto os clientes

das outras rotas são ignorados nesta iteração. Esse processo é repetido até que todos os clientes estejam roteados. Se a rota não estiver vazia, um processo de busca adicional é aplicado para identificar a posição em que o cliente pode ser inserido com o menor custo possível. Se não for possível adicionar um cliente a uma rota devido ao limite de capacidade do veículo, a rota é finalizada e uma nova rota começa a partir do satélite, buscando o cliente mais econômico para a próxima iteração de inserção. Se o limite de rotas m_s for atingido, nenhuma nova rota será criada.

Após a resolução do problema de roteamento referente ao segundo nível, o cálculo da demanda de cada satélite é realizado. Isso é feito a partir da demanda total dos clientes que foram atendidos por todas as rotas SE que partiram daquele determinado satélite. Em seguida, as rotas FE são construídas. Devido ao número relativamente pequeno de depósitos e satélites, muitos métodos utilizam abordagens exatas para solucionar o problema de roteamento FE (AMAROUCHE; GUIBADJ; MOUKRIM, 2018; GU et al., 2022; WANG; SHAO; ZHOU, 2017; WANG et al., 2021; JIE et al., 2019). Entretanto, existem outros métodos que se baseiam em heurísticas, como o vizinho mais próximo (BELGIN; KARAOGLAN; ALTIPARMAK, 2018), a inserção mais barata (LIU et al., 2016), a heurística de economia de Clarke e Wright (HEMMELMAYR; CORDEAU; CRAINIC, 2012) e a inserção aleatória (HE; LI, 2019).

Zhou et al. (2018) e Mhamedi et al. (2022) optam por construir a solução FE criando um grande *tour* que passa por todos os satélites e, em seguida, utilizam um algoritmo de divisão para obter rotas viáveis de FE. Enquanto Breunig et al. (2016), em situações onde os satélites possuem uma demanda que excede a capacidade de um único veículo FE, propõe um processo de pré-processamento. O processo consiste em atender qualquer satélite com demanda superior à capacidade do veículo FE por meio de viagens diretas (ida e volta) partindo do depósito mais próximo, até que a demanda restante seja menor que a capacidade do veículo FE. Após esta etapa, uma heurística de inserção mais barata é aplicada com o objetivo de construir rotas FE para atender a demanda remanescente dos satélites. É importante ressaltar que esta estratégia foi desenvolvida especificamente para esta situação, a fim de garantir a eficiência do processo de roteamento.

2.2.2.2 Busca Local

Heurísticas de busca local são utilizadas para explorar o entorno de uma solução promissora, partindo dela para avaliar soluções vizinhas, obtidas com algum operador de perturbação, como a realocação de um cliente para uma posição diferente dentro da rota,

ou mesmo para uma rota diferente.

Na busca local, o melhor vizinho selecionado como nova solução promissora pode ser feito com uma política de primeira melhor solução, como nos trabalhos de Anderluh et al. (2019) e Amarouche, Guibadj e Moukrim (2018), que leva a convergências mais rápidas a uma solução final, mas também podem ser pautadas em políticas de maior melhoria, onde toda a vizinhança é computada e o que melhor desempenha é selecionado como a próxima solução candidata, como nos trabalhos de Belgin, Karaoglan e Altiparmak (2018) e Liu et al. (2016), mesmo que exija do algoritmo mais tempo computacional.

Os principais operadores utilizados para perturbar as soluções são os de realocação (relocate), troca (exchange), 2-opt, $2 - opt^*$, mudança de satélite (satellite change) e troca de satélite (satellite change).

Os operadores de realocação e troca são utilizados, conforme Amarouche, Guibadj e Moukrim (2018) e Paul et al. (2021), para realocar uma sequência de m clientes na rota e para trocar dois clientes de posição, com clientes individuais e grupos de até 3 clientes, como usado por Crainic et al. (2008), He e Li (2019), Li et al. (2016a, 2016b, 2020), Anderluh, Hemmelmayr e Nolz (2016) e Anderluh et al. (2021).

Os operadores 2-opt e $2 - opt^*$ são operadores intra-rota e inter-rota, respectivamente, entre dois pares de clientes sendo, no caso do 2-opt, a inversão na sequência de atendimento entre dois clientes respectivos ou a substituição de um cliente pelo outro entre clientes de duas rotas diferentes, no caso do $2 - opt^*$. Estes operadores são aplicados apenas nas rotas da segunda camada, como é o caso de Gu et al. (2022), Wang, Shao e Zhou (2017) e Zeng et al. (2014), porém Enthoven et al. (2020) e Liu et al. (2016) também aplicam às rotas da primeira camada do problema, visto que, no caso do $2 - opt^*$, por exemplo, a demanda alocada nos satélites sofrem mudanças, logo a primeira camada também exige alterações.

Para evitar mudanças de demanda nos satélites, Hemmelmayr, Cordeau e Crainic (2012) e Mühlbauer e Fontaine (2021) utilizam a estratégia de só aplicar operadores para rotas da segunda camada que partem de um mesmo satélite, evitando necessidade de recálculo da primeira camada.

Outra estratégia, utilizada por Breunig et al. (2016, 2019) e Zhou et al. (2018), é avaliar somente mudanças entre clientes limitados aos m mais próximos, limitando assim a quantidade de iterações que suas heurísticas.

Os operadores de mudança de satélite (satellite change) e troca de satélite (satellite change) definidos por Zeng et al. (2014) para avaliar se, mudando o satélite que atende uma

rota por outro ou trocando os satélites de atendimento de duas rotas distintas, é possível obter melhores soluções, tais operadores são utilizados também por Belgin, Karaoglan e Altiparmak (2018), Yu, Puchinger e Sun (2020) e Yu et al. (2021), porém é observável que tais mudanças exigem recálculo da primeira camada.

Para tanto, Yu, Puchinger e Sun (2020) utilizam para recalcular a primeira camada sua heurística construtiva, usada para gerar solução inicial, que nada mais é que uma heurística de distância mínima, em que a demanda atendida de cada rota da segunda camada se torna um ponto de demanda no satélite que atende a rota e se junta os pontos de demanda até atender a capacidade do veículo que atende a primeira camada, pegando sempre a menor distancia, isto é, para o primeiro veículo, são pegos os máximos de pontos de demanda possíveis do satélite mais próximo, caso reste capacidade, atende-se demanda do próximo satélite mais próximo, caso contrário, agrupa-se mais demanda para o próximo veículo e assim sucessivamente.

Outros procedimentos de busca local aplicados ao 2E-VRP incluem a reatribuição de clientes ao seu segundo satélite mais próximo (CRAINIC et al., 2011, 2013), um procedimento de busca local de *Lin Kernighan*, criado por Bevilaqua, Bevilaqua e Yamanaka (2019), um procedimento de divisão (HEMMELMAYR; CORDEAU; CRAINIC, 2012) e movimentos relacionados a opções de entrega (ZHOU et al., 2018).

2.2.2.3 *Path relinking*

A principal ideia por trás do *path relinking* (PR) é gerar e explorar a trajetória no espaço de busca conectando uma solução inicial e uma solução alvo (TALBI, 2009), de modo que uma sequência de soluções vizinhas da solução inicial é gerada até a solução alvo e a melhor solução na sequência é retornada pela heurística (NGUYEN; PRINS; PRODHON, 2012).

Para o problema 2E-CVRP os artigos de Anderluh, Hemmelmayr e Nolz (2016) e Crainic et al. (2013) aparecem utilizando a meta-heurística para gerar melhorias em uma solução inicial construída com procedimento guloso sem memória do *GRASP*. (CRAINIC et al., 2013) tomam a solução inicial como solução inicial do PR e a melhor solução obtida até o momento como solução alvo. Já Anderluh, Hemmelmayr e Nolz (2016) realizam a religação do caminho entre a solução inicial e a solução mais diversa no conjunto de soluções geradas até o momento.

Ambos os trabalhos possuem desempenho computacional muito veloz, sendo Crainic et al. (2013) apresentando soluções para instâncias de até 50 clientes e 5 satélites com

gaps médios de até 10% em relação as melhores soluções conhecidas das instâncias até então, isto é, 10% piores com relação as soluções de outros métodos bons. Anderluh, Hemmelmayr e Nolz (2016), por sua vez, apresenta *gaps* de mesma ordem para instâncias de até 125 clientes e 10 satélites.

2.2.2.4 Algoritmos Genéticos

Os Algoritmos Genéticos (AGs) são uma técnica de otimização inspirada no processo de evolução natural (GORA et al., 2020). Esses algoritmos simulam uma seleção natural e reprodução artificial de soluções candidatas a um problema específico.

O processo começa com uma população de soluções aleatórias, representadas por cromossomos que contêm genes que codificam informações relevantes para o problema em questão. Esses cromossomos são avaliados de acordo com uma função de aptidão, que mede o quão bem eles resolvem o problema. Os cromossomos mais aptos são selecionados para reprodução, com maior probabilidade de serem selecionados aqueles que possuem maior aptidão. A reprodução é realizada por meio de operadores genéticos, como a recombinação e a mutação, que combinam os cromossomos selecionados para produzir novas soluções candidatas (GE; JIN, 2021). Essas novas soluções são avaliadas e, se forem mais aptas do que as soluções anteriores, são mantidas na população para a próxima geração. Esse processo é repetido por várias gerações, permitindo que a população evolua e se adapte ao problema em questão até que a população chegue a uma solução factível e ótima ou próxima dela.

As aplicações de AGs no 2E-CVRP incluem trabalhos como de Wang, Lan e Zhao (2017), que considera um cromossomo como uma solução do problema, tendo cada gene sendo uma rota da Primeira (FE) ou segunda (SE) camada, e Zhou et al. (2018) que utilizando vários cromossomos para representar a solução, sendo cada cromossomo uma rota, com seus genes sendo um vértice do problema e usando um cromossomo adicional para ligar cromossomos da FE e SE.

Na abordagem de Wang, Lan e Zhao (2017) as rotas da FE são trabalhadas usando o procedimento de Breunig et al. (2016), criando rotas diretas a satélites com demanda maior que capacidade dos veículos da FE e utilizando método de inserção mais barata para roteirizar a demanda excedente.

Na abordagem de Zhou et al. (2018), a população inicial é criada por meio de um conjunto de heurísticas construtivas, sendo suas funções de aptidão medidas com a função objetivo do problema subtraído de uma penalidade caso a solução desrespeite uma res-

trição do problema. Assim, uma característica dos AGs de Wang, Lan e Zhao (2017) e Zhou et al. (2018) é que permitem formação de cromossomos temporariamente inactíveis, penalizando suas funções de aptidão proporcionalmente à quebra das restrições, porém outros autores como He e Li (2019) e Agárdi, Kovács e Bányai (2019) utilizam funções de correção para impedir qualquer inviabilidade.

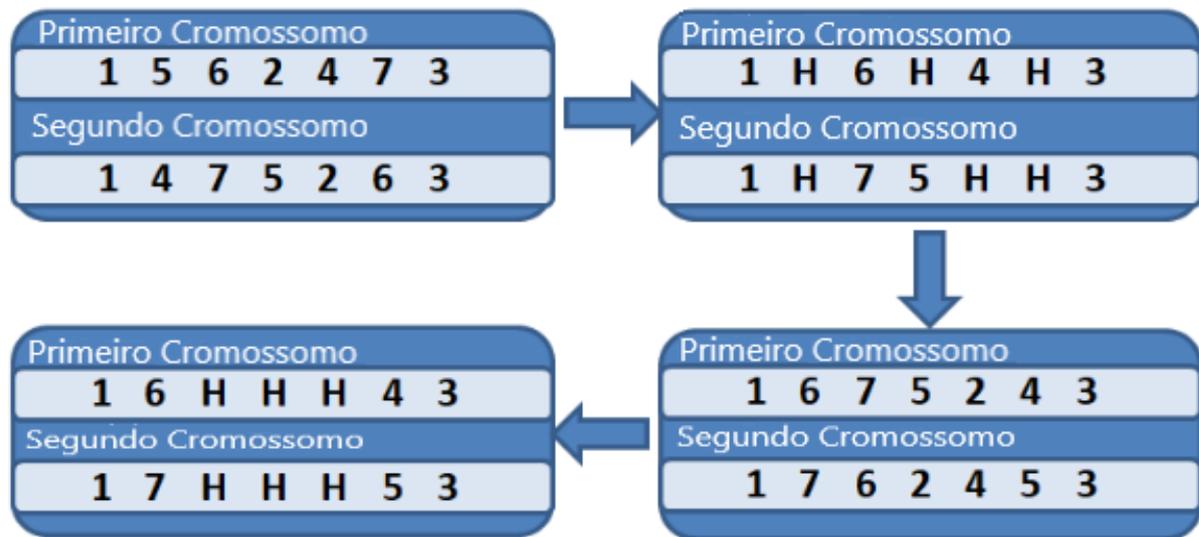
Outros três autores que trabalham com algoritmo genético no problema são Sahraeian e Esmaili (2018), Wang et al. (2021) e Bevilaqua, Bevilaqua e Yamanaka (2019) que também permitem soluções temporariamente inviáveis e aplicam penalidades na função de aptidão. Os critérios de seleção utilizadas pelos autores são:

- Seleção Aleatório: Os indivíduos para reprodução são escolhidos aleatoriamente sem considerar qualquer fator de convergência, como o quão apto é garantindo assim diversidade na próxima solução, mas tendo risco de perder qualidade.
- Torneio: Alguns grupos de indivíduos são formados aleatoriamente, sendo o mais apto de cada grupo escolhido para formar nova população.
- Roleta: Aos indivíduos são atribuídas uma probabilidade em função de suas aptidões e a seleção para reprodução é feita aleatoriamente tendo estas probabilidades, tendo assim maior chance de formar indivíduos tão aptos quanto na geração atual, mas mantendo um fator aleatório para garantir diversidade.
- Melhor Aptidão: Os melhores indivíduos são selecionados, garantindo uma convergência rápida para o problema, porém limitando a diversidade das próximas gerações e arriscando as soluções se prenderem em ótimos locais.

O processo de reprodução ocorre por meio de cruzamento entre pares de cromossomos selecionados. São cinco operadores de cruzamento utilizados pelos autores. O primeiro deles, usado por Agárdi, Kovács e Bányai (2019) e He e Li (2019) é operador baseado em ordem (OX) de Braun (1990) em que dois pontos são escolhidos aleatoriamente, ignorando satélites e depósitos que são os primeiros e últimos genes, os demais pontos tornam-se buracos substituídos pela letra H. Então na ordem que os dois pontos aparecem no cromossomo pai, tornam-se o primeiro e último cliente da rota do cromossomo filho, os pontos buraco são realocados aleatoriamente no meio da rota do cromossomo filho e, por fim, estes pontos do meio são trocados de filhos. A Figura 2 representa o processo deste operador.

O operador de cópia de rota utilizado por Bevilaqua, Bevilaqua e Yamanaka (2019) e Wang, Lan e Zhao (2017) funciona de forma mais simples e aplicado somente para genes

Figura 2: Operador de Crossolver Baseado em Ordem



Fonte: Agárdi, Kovács e Bányai (2019)

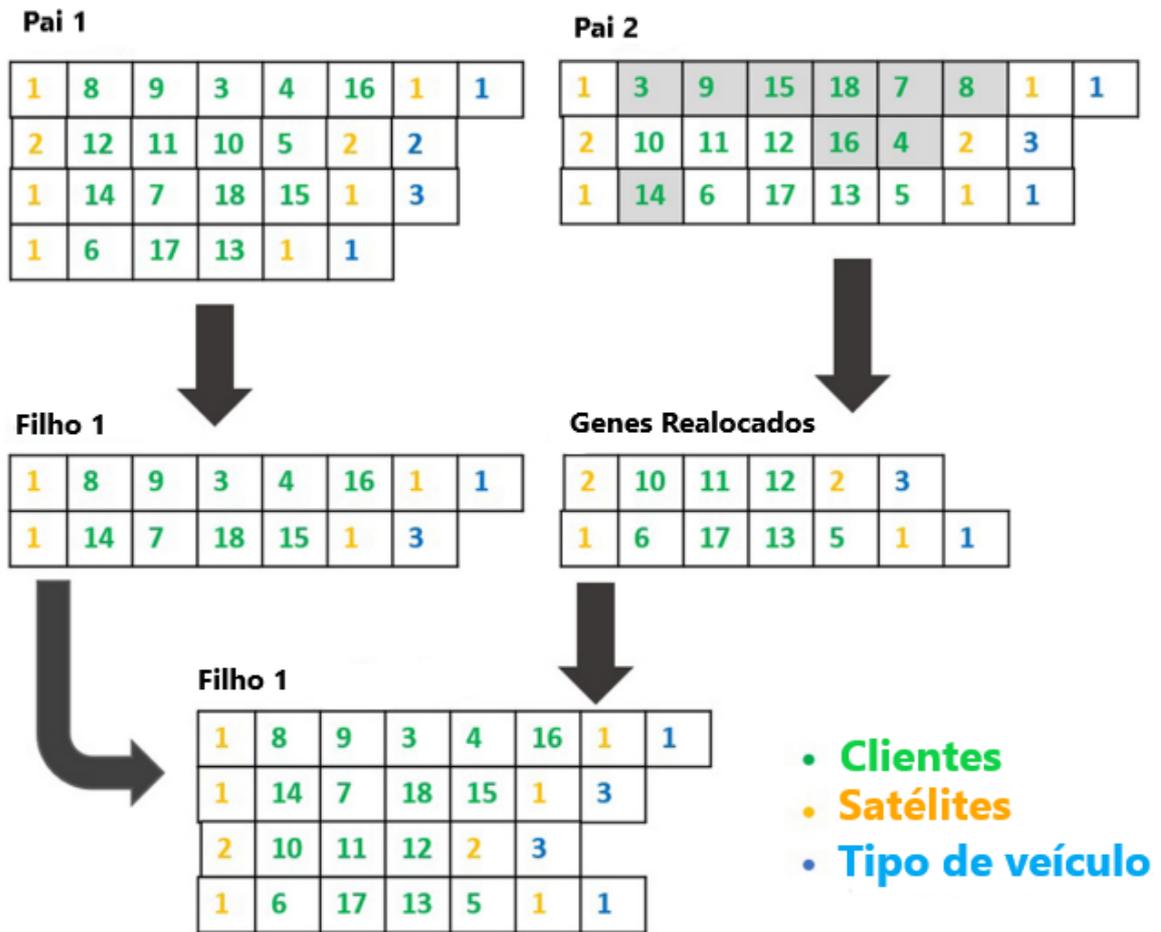
com soluções de segunda camada. Nele alguns clientes são selecionados aleatoriamente do cromossomo Pai 1, eles são transferidos como parcelas de suas respectivas rotas para o filho e removidos das rotas do Pai 2, para finalizar, as rotas remanescentes do Pai dois são passadas para o filho. A Figura 3 representada esse processo.

O operador ciclo de crossover também usado por Agárdi, Kovács e Bányai (2019) é baseado no trabalho de Starkweather et al. (1991) e os filhos são gerados por meio da transferências de todos os clientes do Pai 1 para o filho 2 e vice versa, de modo que na prática, o que ocorre é que os clientes do Pai 1 passam a ser atendidos pelo satélite e veículo do 2 e vice versa. A Figura 4 representa o processo.

O operador de Crossover Parcialmente mapeado (PMX) usado também por Agárdi, Kovács e Bányai (2019) e Wang et al. (2018) é um híbrido entre o operador baseado em ordem e o operador de ciclo de crossover, em que dois seguimentos de cada cromossomo pai é selecionado aleatoriamente e copiado em seu respectivo filho e os segmentos não copiados são passados para os filhos dos demais pais, sendo em todos os 3 operadores os filhos passando por uma busca local do tipo 2-opt para melhorar solução. A Figura 5 representa a operação.

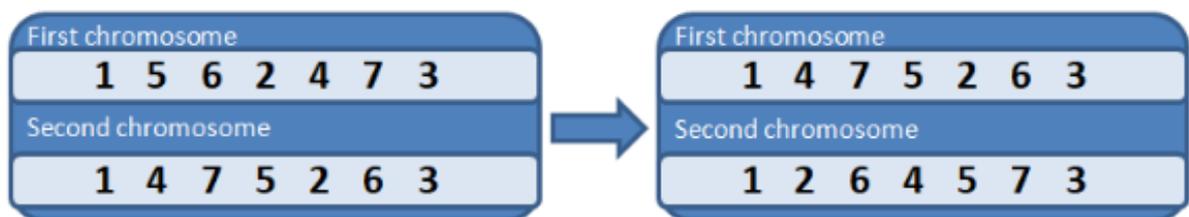
O operador de 2 pontos usados por Sahraeian e Esmaili (2018) e Wang e Wen (2020) representa dois cortes nas rotas de cada pai, de modo que os clientes no meio dos cortes são trocados de um para o outro e copiados para formar os filhos.

Figura 3: Operador de Crossolver de Cópia de Rota



Fonte: Agárdi, Kovács e Bányai (2019)

Figura 4: Operador de Crossolver Baseado em Ciclo



Fonte: Agárdi, Kovács e Bányai (2019)

Por fim, um operador específico para o 2E-VRP foi desenvolvido por Zhou et al. (2018) e que tem funcionamento semelhante ao operador de 2 pontos. Nele, as rotas dos satélites dos cromossomos pais são recortadas em segmentos intermediários e depois permutados para criar os filhos da próxima geração, utilizando ajustes simples para compensar clientes

Figura 5: Operador de Crossover Parcialmente mapeado



Fonte: Agárdi, Kovács e Bányai (2019)

repetidos ou faltantes.

Após os cruzamentos os autores aplicam operações de mutação em alguns descendentes trocando clientes de posição e aplicando uma busca local adicional para melhorar as soluções. Os descendentes resultantes são usados como nova população para próxima geração. O critério de parada dos autores é uma quantidade de interações sem melhoria.

2.3 Sistema de Apoio a Decisão

Sistemas de apoio à decisão (DSS) são um conjunto de técnicas, metodologias e ferramentas que auxiliam os usuários a tomar decisões mais informadas e confiáveis. Esses sistemas utilizam dados e informações coletados de diversas fontes para criar modelos, simulações e análises que ajudam os usuários a entender melhor a situação em que se encontram e a escolher a melhor opção possível por meio de uma interface interativa e amigável (KAZAK, 2018).

De acordo com Turban (2005), os DSSs podem ser classificados em diferentes tipos, como sistemas de informação, sistemas de modelagem, sistemas de apoio à comunicação e sistemas de apoio à decisão em grupo. Power (2002) também aponta para diferentes tipos de DSSs, tais como sistemas especialistas, sistemas de apoio à decisão baseados em conhecimento, sistemas de apoio à decisão baseados em modelo e sistemas de apoio à decisão em grupo. Já Sharda, Delen e Turban (2013) os classificam em sistemas de relatórios, sistemas de mineração de dados, sistemas de análise de negócios e sistemas de inteligência artificial.

Portanto, é possível observar que existem diversas formas de se classificar os DSSs, cada uma com suas próprias características e benefícios, dependendo do contexto em que é utilizado.

Para o 2E-CVRP, uma possível classificação para um DSSs focado em ajudar a escolher

boas rotas no *last mile* seria, para Caggiani et al. (2020), como um sistema de apoio à decisão baseado em modelos, uma vez que, conforme Barfod e Salling (2015) e Rahman e Akhter (2015), esse tipo de sistema utiliza modelos matemáticos para encontrar soluções ótimas ou sub-ótimas para problemas complexos, minimizando, segundo Fabbri e Vicen-Bueno (2019), ao mesmo tempo os riscos para o tomador de decisão, por permitir a avaliação de rotas alternativas. Além disso, Feng e Zhang (2012) e Richmond et al. (2018) apontam que o uso de modelos permite a consideração de múltiplos critérios de decisão, como tempo, custo e qualidade de serviço, de forma a encontrar a melhor rota possível para cada situação.

2.3.1 Benefícios de uso dos DSSs

Os benefícios do uso do DSS são diversos, dentre eles, a melhoria do processo de tomada de decisão, a redução de erros, a diminuição do tempo gasto na tomada de decisão e a otimização do uso de recursos (CIPTAYANI; DEWI, 2018).

No entanto, é importante ressaltar que o sucesso da aplicação de um DSS depende da escolha adequada do modelo, da qualidade dos dados utilizados, da capacitação dos usuários e da integração do sistema com outros sistemas corporativos (MAZZUTO et al., 2018).

No contexto de gestão de entregas no *Last Mile*, os DSSs tem sido aplicado para otimizar a roteirização de entregas, melhorar a gestão de frotas, reduzir custos operacionais, aumentar a satisfação do cliente, entre outros (ASSIS et al., 2022).

Alieinykov et al. (2019), Aggarwal, Kumar e Tiwari (2018) e Guo et al. (2020) demonstram que os sistemas de apoio à decisão apresentam diversos benefícios de uso, tais como:

- Melhora da qualidade das decisões: os DSSs ajudam os usuários a tomar decisões mais informadas e embasadas em dados e informações relevantes.
- Redução de riscos: por meio da análise de dados e informações, os DSS ajudam a identificar possíveis riscos e incertezas que possam afetar a decisão.
- Economia de tempo e recursos: os DSSs permitem que os usuários obtenham informações relevantes de forma mais rápida e precisa, reduzindo o tempo e os recursos necessários para tomar uma decisão.
- Suporte a decisões complexas: os DSSs são especialmente úteis em situações em que

as decisões são complexas e envolvem diversas variáveis e incertezas.

2.3.2 Aplicações práticas dos DSSs

Os sistemas de apoio à decisão têm sido aplicados em diversos setores, como negócios, saúde, meio ambiente e agricultura, entre outros. Algumas aplicações práticas incluem:

Na agricultura, os DSSs têm sido utilizados para auxiliar os agricultores na tomada de decisões relacionadas ao manejo da cultura, como o uso de fertilizantes, irrigação e controle de pragas. Por exemplo, o estudo de Picoli et al. (2018) apresentou sistemas de apoio à decisão na agricultura, destacando o uso de imagem de satélites e inteligência artificial para identificação de regiões de florestas, plantação, desmatamento e outros para planejamento de ações de monitoramento da agricultura brasileira.

Na área de saúde, os DSSs têm sido utilizados para auxiliar os médicos na tomada de decisões clínicas, como o diagnóstico e tratamento de doenças. Por exemplo, o estudo de Lee et al. (2019) apresentou um sistema de apoio à decisão clínica para planejamento de vacinação infantil. Um segundo exemplo é o trabalho de Carrasco-Ribelles et al. (2022) que propõe sistema para acompanhamento de risco de multimorbidade e fragilidade de idosos em casas de repouso.

Na área de negócios, os DSS têm sido amplamente utilizados para auxiliar na tomada de decisões estratégicas, táticas e operacionais. Eles podem ser aplicados em diversas áreas, tais como finanças, marketing, recursos humanos, logística e produção, a citar o trabalho de Piatkowski e Marshall (2018) que usam o DSS para avaliar investimentos em transporte e Shao, Shao e Pi (2022) que os usam para planejar consumo de energia e mão de obra no problema de sequenciamento de *flow shop*.

2.3.3 Aplicação de DSSs em Problemas de *Last Mile* e VRPs

No setor de logística, os DSSs têm sido amplamente utilizados para otimizar a gestão da cadeia de suprimentos e melhorar a eficiência dos processos de entrega. Segundo Al-nawayseh et al. (2013), um dos principais benefícios dos DSSs na gestão de entregas no *Last Mile* é a redução do tempo de entrega e dos custos logísticos de forma interativa, onde o tomador de decisão pode utilizar da capacidade de geração de relatórios e análise para selecionar boas alternativas rapidamente. Segundo Psarommatis e Kiritsis (2022), os DSSs permitem a coleta e análise de dados em tempo real, o que facilita a tomada de decisão e a identificação de possíveis problemas na cadeia de suprimentos.

Na área de logística, os DSSs têm sido amplamente utilizados para resolver problemas relacionados ao planejamento e gestão da cadeia de suprimentos. Um dos principais desafios enfrentados pelas empresas de logística é a gestão do processo de entrega, especialmente no que se refere ao *Last Mile*, ou seja, o trajeto final que o produto percorre até chegar ao seu destino, incluindo avaliação de localização de pontos de distribuição e sua frota (FIKAR; HIRSCH; GRONALT, 2018).

Os DSSs podem ser aplicados para otimizar o processo de *Last Mile*, garantindo uma entrega mais eficiente e satisfatória para o cliente. Uma das aplicações mais comuns é a utilização de algoritmos de roteamento para otimizar as rotas de entrega, levando em consideração fatores como a distância entre os pontos de entrega, o tempo de deslocamento, o volume de entregas e tipo de frota de veículos disponível (FIKAR; HIRSCH; GRONALT, 2018).

Considerando variáveis como tempo, distância, custo e capacidade de carga dos veículos, Perboli e Rosano (2018) desenvolvem um DSS para ajudar os tomadores de decisão de logística à otimizar a roteirização de entregas, gestão de frotas, planejamento e o despacho de rotas, bem como facilitar o compartilhamento eficiente de informações para avaliar transportes colaborativos na entrega de produtos utilizando vans e veículos ecológicos, como bicicletas, no problema de roteamento de veículos capacitados de uma única camada dentro de zonas urbanas.

Além disso, os DSSs também podem ser utilizados para a previsão de demanda, o que permite às empresas planejar melhor as entregas e reduzir o tempo de espera dos clientes (ŞENSOY; UYSAL; ŞORMAN, 2016). Isso é especialmente útil em períodos de alta demanda, como em épocas festivas.

Outra aplicação interessante é, para Ahmed e El-Sayegh (2020), a utilização de técnicas de inteligência artificial para avaliar diferentes formas de entrega, sendo possível ainda utilizar para a previsão de possíveis atrasos e falhas no processo de entrega. Com isso, as empresas podem se antecipar aos problemas e encontrar soluções alternativas para garantir a satisfação do cliente.

2.3.4 Etapas e Noções para o desenvolvimento do DSS

O desenvolvimento de um Sistema de apoio a Decisão (DSS) requer uma metodologia bem definida para garantir a qualidade do processo e efetivamente do sistema. Para Power (2002), a metodologia pode ser dividida em cinco etapas: análise de requisitos,

modelagem conceitual, *design* físico, implementação e testes. Cada etapa possui suas próprias atividades e entregáveis, que devem ser cuidadosamente planejados e executados para garantir o sucesso do projeto. Turban (2005) por sua vez, resume as etapas em apenas 3: a fase de análise, a fase de *design* e a fase de implementação. Na fase de análise, é realizada uma análise detalhada do problema a ser resolvido e das necessidades do usuário. Já na fase de *design*, é feita a escolha da abordagem e das ferramentas a serem utilizadas para a construção do DSS. Por fim, na fase de implementação, o DSS é construído e testado.

Baseado nas etapas de (POWER, 2002), pode-se conceituar a primeira etapa, análise de requisitos, como a fase de coleta de informações sobre as necessidades do usuário e dos *stakeholders* envolvidos no projeto (REXFELT; ROSENBLAD, 2006). Nessa etapa, é importante identificar quais são os problemas a serem resolvidos e quais são as funcionalidades que o sistema deve possuir para atender às demandas dos usuários (YUE; FENG, 2021).

Após a coleta de requisitos, a segunda etapa consiste na modelagem conceitual do sistema. Nessa fase, é necessário definir a arquitetura do sistema, os processos de negócio envolvidos e as entidades do domínio de negócios que serão utilizadas no sistema (MENSHEININ; CRAWLEY, 2020). A modelagem conceitual deve ser elaborada em conjunto com os usuários e *stakeholders* para garantir que o sistema atenda às necessidades do negócio (ALOTAIBI, 2020).

A terceira etapa é o *design* físico do sistema, em que é definido como o sistema será implementado. Nessa fase, são definidos os componentes de hardware e software que serão utilizados, a forma como os dados serão armazenados e gerenciados, e como as interfaces serão desenvolvidas (POWER, 2002). O *design* físico deve ser realizado em conjunto com a equipe de TI para garantir a viabilidade técnica do sistema.

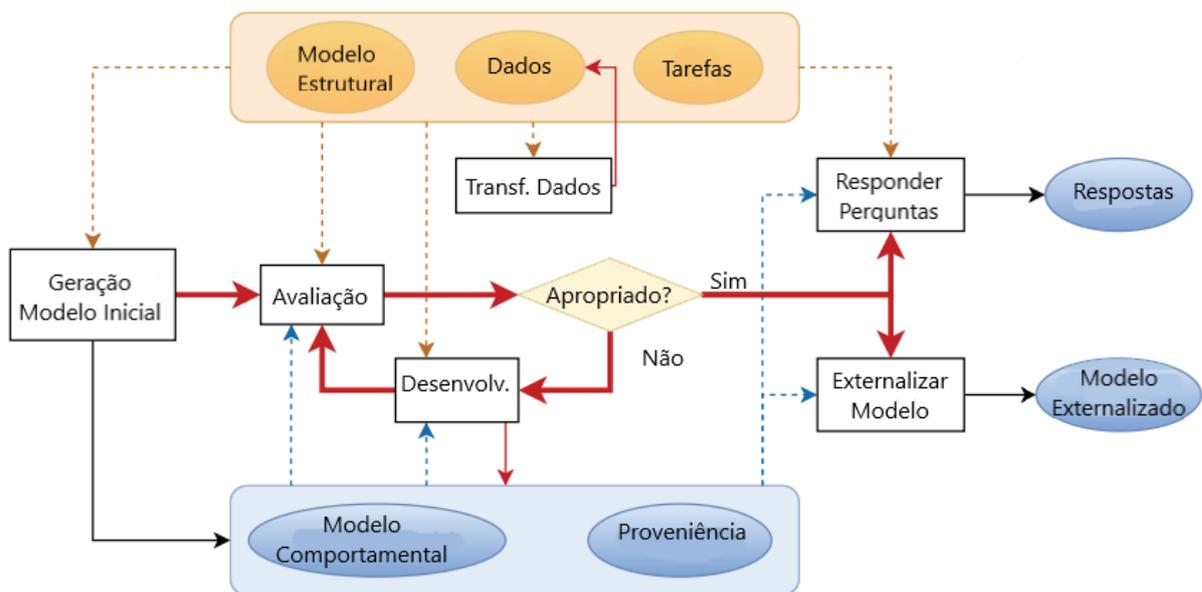
Após a definição do *design* físico, é realizada a implementação do sistema. Nessa fase, o código é escrito e os componentes são integrados para formar o sistema completo (KöNNöLä et al., 2016). É importante que a implementação seja realizada com base nos padrões e práticas recomendadas para garantir a qualidade do código e a manutenibilidade do sistema, em especial para sistemas de serviço web (VIRILI; SORRENTINO, 2008).

Por fim, a última etapa é a fase de testes, em que o sistema é avaliado para garantir que ele atenda às expectativas dos usuários e esteja livre de erros e *bugs*. Nessa etapa, são realizados testes funcionais e de desempenho para garantir a qualidade do sistema (DUKES; YUAN; AKOWUAH, 2013). É importante que os testes sejam realizados em

conjunto com os usuários para garantir a validação dos requisitos e a aceitação do sistema.

Durante o desenvolvimento de um DSS, algumas particularidades devem ser consideradas e aplicadas. Um resumo esquemático delas é dada por Ferreira et al. (2021) e apresentada na Figura 6. Nele, todo o desenvolvimento inicia após o levantamento de todos os requisitos, parâmetros e casos especiais do problema que dever ser resolvido com o uso da ferramenta. A partir disso, conforme o autor, deve-se elaborar a estrutura do modelo, que será utilizado pelo modelo de solução na etapa de resolução do problema (“Avaliação”), bem como construção do banco de dados (“Dados”) do problema, o processo de transformação dos dados (“Transf. Dados”) para adequar o dado a estrutura do modelo e as tarefas que o decisor deve realizar, tais quais inserir parâmetros desejados para o modelo de solução resolver, bem como os objetivos desejáveis de solução que o decisor deve buscar com o apoio da ferramenta.

Figura 6: Fluxo de Processo de Desenvolvimento do DSS



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2021)

A partir disso, um grande ciclo inicia com a geração do modelo inicial para resolver o problema, gerar resultados e desenvolver as telas que o decisor terá contato, dado os parâmetros a serem inseridos no modelo, então os testes iniciam com a “Avaliação” averiguar se sistema está apropriado, caso não, volta-se ao desenvolvimento, caso sim, averigua-se se as tarefas estão sendo bem feitas, se o DSS responder as perguntas de decisão. Junto desse ciclo, deve-se realizar a avaliação do comportamento do decisor (“Modelo Comportamental”) frente a tela e as soluções do modelo, além de observar

se ele consegue compreender a origem das soluções e se elas lhe são realmente úteis e adequadas (“Proveniência”) para que o decisor possa tomar as respostas do sistema como suas respostas. A finalização de tudo é a externalização do modelo, onde torna-se o sistema aplicável à vários casos além do caso dos casos de testes utilizados no desenvolvimento (“Externalizar Modelo” e “Modelo Externalizado”).

2.3.5 Características importantes de um DSS em um sistema logístico de last mile

Para que um DSS seja aplicado de forma eficiente na gestão de entregas no *Last Mile*, é necessário que ele apresente algumas características essenciais. De acordo com Zhang, He e Xu (2012), o DSS deve ser capaz de lidar com grandes volumes de dados, permitindo a integração de informações sobre clientes, endereços de entrega, rotas de entrega, entre outros. Além disso, dada a imprevisibilidade do *Last Mile*, Lankshear, Ettorre e Mason (2005) afirmam que o sistema deve ser capaz de se adaptar a diferentes cenários e situações de forma flexível.

Outra característica essencial do DSS na gestão de entregas no *Last Mile* é a capacidade de roteirização eficiente e geração de relatórios e análise. Conforme Perboli e Rosano (2018), os dados coletados ao longo do processo de entrega, como tempo de chegada, tempo de espera, tempo de entrega e satisfação do cliente, são fundamentais para a melhoria contínua do processo logístico. Através da análise desses dados, é possível identificar gargalos, pontos de melhoria e oportunidades de otimização, resultando em redução de custos, aumento da eficiência e melhoria da experiência do cliente, para isso, o sistema deve gerar um bom roteiro de entregas que se aproxime do ótimo em pouco tempo.

Dentre as técnicas de análise de dados, destaca-se a utilização de algoritmos de aprendizado de máquina e análise de dados em tempo real. Para Basha e Rajput (2019), estes algoritmos permitem a análise preditiva de dados, indicando possibilidade de identificar possíveis atrasos nas entregas e falhas no processo logístico antes que ocorram, permitindo assim medidas corretivas antes que os problemas afetem o cliente. Além disso, o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, segundo Chen et al. (2020), também possibilita a identificação de padrões no comportamento dos clientes, o que pode levar a estratégias de *marketing* mais eficazes e personalizadas.

Outra característica importante de um DSS para gestão de entregas no *last mile* é a sua capacidade de comunicação em tempo real e integração com outros sistemas e tecnologias.

O *last mile* é, segundo Siegfried e Zhang (2021), uma etapa crítica do processo logístico, e é influenciado por diversos fatores, como condições climáticas, congestionamento de tráfego, mudanças de rota e variações na demanda dos clientes. Portanto, para Fouial e Díaz (2021), é fundamental que o DSS seja capaz de se integrar com outros sistemas, como sistemas de gerenciamento e comunicação de frotas, sistemas de previsão meteorológica e sistemas de gerenciamento de inventário, para fornecer informações precisas e atualizadas para os usuários e garantir uma operação logística mais eficiente e confiável.

Em resumo, as principais características que um DSS deve conter para ser aplicado em um sistema logístico de *last mile* são:

- Integração de dados: O DSS deve ser capaz de integrar informações de diferentes fontes, como dados de clientes, rotas de entrega, informações sobre produtos, estoques, entre outros. Isso é importante para garantir a precisão e a eficiência do sistema de entrega no *last mile* (ZHANG; HE; XU, 2012).

- Flexibilidade: O DSS deve ser capaz de se adaptar a diferentes tipos de entregas e condições de operação, como entregas programadas, entregas urgentes, entregas em locais de difícil acesso, entre outros (LANKSHEAR; ETTORRE; MASON, 2005).

- Roteirização eficiente e Geração de relatórios e análise: O DSS deve ser capaz de criar rotas de entrega eficientes e otimizadas, levando em consideração variáveis como distância, tempo de entrega, quantidade de entregas, tráfego, entre outros fatores, para então gerar relatórios e análises sobre o desempenho do sistema de entrega no Last Mile, como a eficiência das rotas, tempo de entrega, número de entregas, satisfação do cliente, entre outros aspectos. Esses relatórios podem ser utilizados para otimizar o sistema e identificar possíveis problemas (PERBOLI; ROSANO, 2018).

- Comunicação em tempo real e integração de sistemas: O DSS deve ser capaz de fornecer informações em tempo real sobre a localização dos entregadores, o status das entregas e eventuais problemas que possam surgir durante a rota de entrega (FOUIAL; DÍAZ, 2021).

A implementação de um DSS que contemple essas características pode trazer diversos benefícios para o sistema logístico de *Last Mile*, como a redução de custos operacionais, a otimização do tempo de entrega, a melhoria da satisfação do cliente, entre outros aspectos. Por isso, é importante que as empresas que atuam nesse setor considerem a utilização de um DSS como uma estratégia para melhorar o desempenho de suas operações logísticas (PERBOLI; ROSANO, 2018).

3 METODOLOGIA

Este trabalho visa o desenvolvimento de um Sistema de apoio a Decisão (DSS) para treinamento de profissionais em logística e alunos em planejamento de rede logística de dois estágios em problemas de entrega de *e-commerce*. A pesquisa é desenvolvida em duas frentes, uma relacionada ao levantamento, análise de dados e elaboração de heurística rápida e eficiente para resolver o problema de roteirização dado uma rede logística parametrizada no DSS, e outra ligada ao desenvolvimento do DSS, com as definições de tecnologias a serem empregadas, desenvolvimento de códigos e testes.

A pesquisa tem foco mais quantitativo com desenvolvimento de métodos heurísticos, mas também questões qualitativas foram empregadas durante execução de testes e *feedbacks*, visto que alunos e profissionais em logística foram convidados a realizar testes de usabilidade do sistema. Sendo assim, o desenvolvimento da pesquisa foi baseado em métodos mistos propostos por Creswell (2014).

3.1 Etapas do Desenvolvimento do DSS

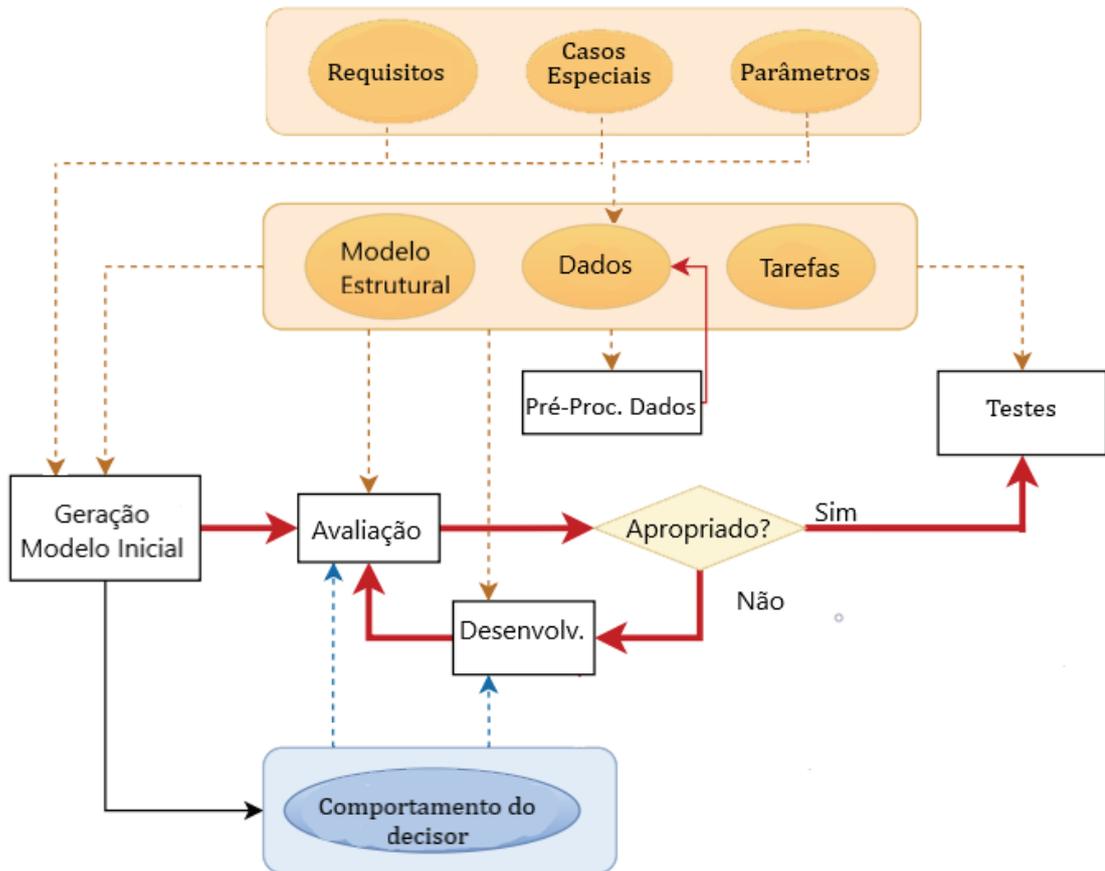
Para o desenvolvimento do DSS para o 2E-CVRP, os princípios e etapas descritos por Ferreira et al. (2021), Power (2002) e Turban (2005) foram adaptados para desenvolvimento, conforme apresentado nas próximas seções e representados no diagrama da Figura 7.

3.1.1 Levantamento de requisitos, casos especiais e parâmetros do problema

Todo o levantamento inicial realizado neste trabalho foi pautado na literatura e em estudo de caso de uma grande empresa de entrega de pacotes de *e-commerce* na cidade de São Paulo.

Como requisito principal, o tomador de decisão deve ser capaz de decidir uma rede logística desejada, avaliar seu desempenho potencial e realizar alterações em sua decisão. A rede logística aqui refere-se ao conjunto de satélites que atenderá os clientes e a frota de veículos em cada satélite.

Figura 7: Diagrama do Fluxo do desenvolvimento do DSS



Fonte: Adaptado de Ferreira et al. (2021), Power (2002) e Turban (2005)

Os parâmetros de entrada no modelo referem-se ao que foi estabelecido na literatura, dentre eles a demanda dos clientes, fornecida pela empresa, distância e tempo de viagem entre pontos, coletados por meio da *API Open Street Maps*, os custos de deslocamento e por tempo de trabalho, além da capacidade de veículos, estimados a partir de dados da empresa, fichas técnicas dos veículos e Tabela de Fretes do Guia do TRC TRC (2023).

Os demais requisitos do sistema são:

- Resolver o 2E-CVRP com os parâmetros atribuídos,
- Mostrar os valores dos indicadores de desempenho da rede.
- Mostrar no mapa os dados do problema. Isto inclui a localização dos clientes, satélites e depósito e quantidade de pacotes a serem entregues total em cada localização.

Um caso especial, que foge ao problema original do 2E-CVRP, é que para clientes

com entregas que superem a capacidade dos veículos de entrega dos satélites, a entrega deve ser realizada diretamente pelo depósito, diferente do que é estabelecido pelo modelo original do Problema.

3.1.2 Estrutura do modelo, banco de dados e tarefas

A estrutura do modelo segue baseada no problema original do 2E-CVRP com duas adaptações para atender as características da logística de *e-commerce*. A primeira delas surge em decorrência das demandas volumosas em condomínios: caso o volume total exceda a capacidade dos veículos da segunda camada (SE), essas demandas devem ser atendidas diretamente pelo depósito. Portanto, é necessário um pré-processamento dos dados para incluir no modelo um conjunto de clientes a serem atendidos diretamente pelo depósito na primeira camada (FE).

A segunda adaptação refere-se a inclusão de mais limitações aos veículos abordando, além do já existente parâmetro m_s que indica a quantidade máxima de viagens que um veículo do satélite s pode realizar, o parâmetro T_s que indica o tempo máximo de trabalho diário que o veículo (ou motorista) pode exercer por dia e D_s que indica a autonomia do veículo no satélite s ou a distância máxima que suas rotas podem ter.

O banco de dados do problema foi disponibilizado pela empresa que faz parte do estudo de caso e contém a localização dos clientes na cidade em um ano de entrega, as datas de realização da entrega e seus respectivos atributos de quantidade de pacotes e peso.

O banco de dados não inclui uma lista de satélites que podem ser utilizados na cidade, por isso, para fins de treinamento, algumas opções de satélites para a pesquisa foram geradas aleatoriamente seguindo uma distribuição uniforme para definir suas localizações, bem como seus respectivos custos e capacidades.

O dado referente ao depósito central foi alterado neste trabalho para garantir o anonimato da empresa. Por fim, as tarefas a serem realizadas pelo usuário durante uso do DSS incluem a seleção dos satélites candidatos, dado a lista de satélites disponíveis, e a atribuição de um tipo de veículo para o satélite, sendo o objetivo identificar a seleção que otimize o problema.

3.1.3 Geração inicial do modelo e avaliação de resultados

O modelo de solução será uma heurística de busca local baseada em um modelo matemático baseado em arcos adaptada de Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013), que inclua as ressalvas apresentadas anteriormente. Os objetivos devem incluir encontrar solução mais econômica, a mais rápida e a que melhor utiliza os veículos dentro do prazo máximo estipulado para realização das entregas.

A heurística foi iniciada com uma construtiva de inserção mais econômica, baseada no trabalho de Liu et al. (2016), para então passar por um processo de busca local utilizando operadores do tipo troca, visando alcançar tempos computacionais de até 30 segundos e *gaps* de 10% em relação ao ótimo, sendo o ideal *gaps* próximos a 0%. O tempo de 30 segundo é apontado por Santos (2021) como um tempo que um grupo aceita esperar por uma solução enquanto pensa em novas alternativas.

A avaliação de resultados foi realizada com alunos de pós-graduação da Universidade de São Paulo e profissionais em logística, que utilizaram a ferramenta no papel de um avaliador de rotas de entrega de *e-commerce* e tiveram por objetivo encontrar soluções para problemas descritos em casos distintos, com objetivos distintos. Nas seções de testes, os participantes devem realizar um relatório sobre seu uso, as soluções que encontrou e o quão boa a ferramenta se mostrou. Junto do relatório uma entrevista será realizada para identificar potenciais pontos de melhoria no sistema para correções e aprimoramentos. As seções de testes poderão ser repetidas caso a ferramenta precise de grandes atualizações.

3.1.4 Desenvolvimento, Testes e Comportamento do decisor

A implementação do sistema ocorrerá baseada com diferentes conjuntos de linguagens de programação para o *frontend* e para o *backend*.

O *frontend*, isto é, as telas em que os decisores analisam os dados, avaliaram suas decisões e interagem com sistema, foi desenvolvido utilizando as linguagens de desenvolvimento web *HTML5*, *CSS3* e *Javascript*, tendo por base a biblioteca *react js* como matriz de desenvolvimento e gerenciador de linguagens. O *backend* foi desenvolvido para resolver o problema sendo programado em python e utilizou o *Flask* para criar serviço *API Rest* de requisições *http*.

A etapa de avaliação, junto da solução da opção atual do decisor, foi apresentada, graficamente, a melhor solução já encontrada por ele junto com a solução favorita para ser capaz de observar o quão melhor ou pior suas decisões estão ficando, além de possibilitar

compreender o impacto de *trade offs* que suas mudanças de opção causam na solução do problema.

Os testes de usabilidade foram conduzidos com a participação de 22 indivíduos, incluindo alunos de cursos de graduação e pós-graduação em logística, além de profissionais atuantes na área. Para orientar esses testes, desenvolvemos um *script* que incluía uma série de questionamentos destinados a orientar a tomada de decisão, acompanhado de um questionário elaborado conforme Ahmad e Hussaini (2021). Este questionário foi planejado com o intuito de capturar as percepções dos participantes acerca da qualidade e funcionalidade do sistema. A avaliação comportamental dos usuários foi realizada visualmente, sendo todos os testes gravados, visando observar que recursos do sistema são efetivamente utilizados pelos tomadores de decisão, quais são ignorados, além de visar identificar quaisquer desconfortos que usuários possam ter durante uso.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

4.1 Contexto do DSS

O DSS desenvolvido neste trabalho utiliza linguagem de programação Python para desenvolvimento da API Rest responsável por gerenciar o *backend* do sistema, contendo o pré-processamento dos dados e execução de heurísticas de roteirização. O *frontend* foi desenvolvido utilizando *HTML5*, *CSS3* e *Javascript*, por meio da interface da biblioteca do *javascript react js*. O desenvolvimento e utilização da ferramenta foi realizada em uma máquina com as seguintes especificações de hardware: um processador 11th Gen Intel(R) Core(TM) i7-1165G7 @ 2.80GHz com frequência de clock de 1.69 GHz, 16GB de memória RAM e um disco SSD com capacidade de armazenamento de 1TB. Todavia, os testes de usabilidade do sistema foi realizado em diferentes máquinas.

O DSS tem uma interface de *setup* onde o instrutor define algumas características que os alunos terão de lidar para resolver. Neste *setup* o instrutor pode selecionar as regiões que os alunos devem avaliar, podendo escolher regiões de alta densidade de entrega, baixa densidade de entrega ou mesmo regiões mistas. Além disso, pode selecionar os tipos de veículos disponíveis para estudo, os satélites que estarão disponíveis para avaliação e o padrão de demanda dos clientes, que podem seguir um padrão homogêneo de pacotes ou o padrão real do estudo de caso, em que cada cliente recebe pacotes em diferentes quantidades e peso.

O sistema também possui uma interface do usuário que está sendo treinado. Esta interface apresenta um mapa da região de operação, marcando os satélites, os veículos disponíveis e a distribuição da demanda na área. O usuário, no caso o aluno, tem a responsabilidade de ativar um conjunto de satélites para atender à demanda. Além disso, ele tem a opção de ajustar o tipo de veículo atribuído a cada satélite, podendo até mesmo optar por não selecionar nenhum satélite, o que levaria o sistema a calcular rotas a partir do centro de distribuição, seguindo a lógica de um VRP clássico.

Além do mapa, essa interface apresenta uma área dedicada à avaliação do desempenho das alternativas criadas. Nessa seção, os usuários encontram tabelas de resultados e gráficos que acompanham o desempenho das diferentes soluções propostas.

4.2 Estudo de Caso

A empresa estudada neste trabalho é uma varejista de *e-commerce* de grande relevância no setor, abrangendo toda a América Latina. Com sua presença abrangente e sua atuação no comércio eletrônico, a empresa enfrenta o desafio de ofertar entregas rápidas e eficientes para seus clientes no contexto atual em que o crescimento contínuo do *e-commerce*, a satisfação do cliente e a eficiência operacional são fatores críticos para o sucesso da empresa.

Uma parte essencial do propósito dessa ferramenta é capacitar o aluno a desenvolver sua intuição por meio da interação visual na resolução de problemas. Isso permite que ele analise os dados de entrega da empresa e identifique a melhor estrutura para a distribuição no (*last mile*) da cadeia logística. Especificamente, o objetivo do estudo é aprimorar a habilidade de otimizar as rotas de entrega para o consumidor final, visando reduzir o tempo de entrega e melhorar a eficiência geral do processo logístico, por meio de mudanças no *design* logístico da empresa.

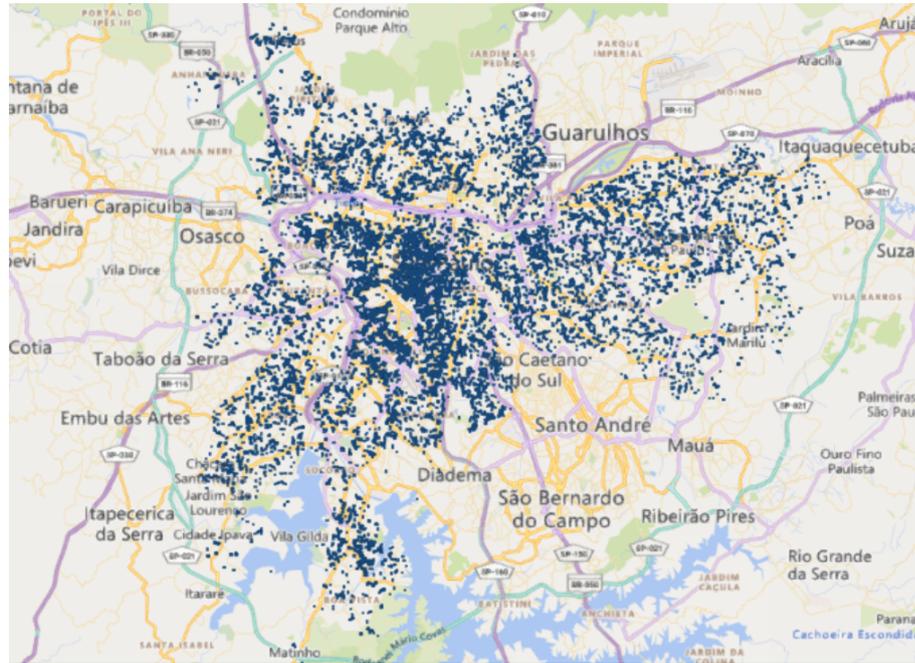
A amostra utilizada neste estudo consiste em dados de um dia de entregas da empresa na cidade de São Paulo. Foram analisadas 12 mil remessas, representativas de uma amostra significativa das operações diárias da empresa na região. A cidade de São Paulo foi escolhida como foco do estudo devido sua relevância como um dos principais centros de comércio e densidade populacional na América Latina. Para coletar os dados, foram utilizados registros internos da empresa, incluindo informações sobre os endereços de entrega, quantidade de pacotes e peso das entregas.

4.2.1 Dados de Entrega

Os dados de entrega a serem utilizados neste trabalho consistem no endereço de entrega das remessas, a quantidade de pacotes e os pesos das remessas. Para a compreensão da distribuição da demanda e características das remessas no estudo de caso, a Figura 8 apresenta uma representação gráfica da distribuição da demanda na cidade de São Paulo. Através desse gráfico, em conjunto da Figura 9 que apresenta um mapa de calor da quantidade de pacotes, é possível visualizar as áreas da cidade com maior concentração de demanda e identificar possíveis padrões ou áreas de interesse para o estudo.

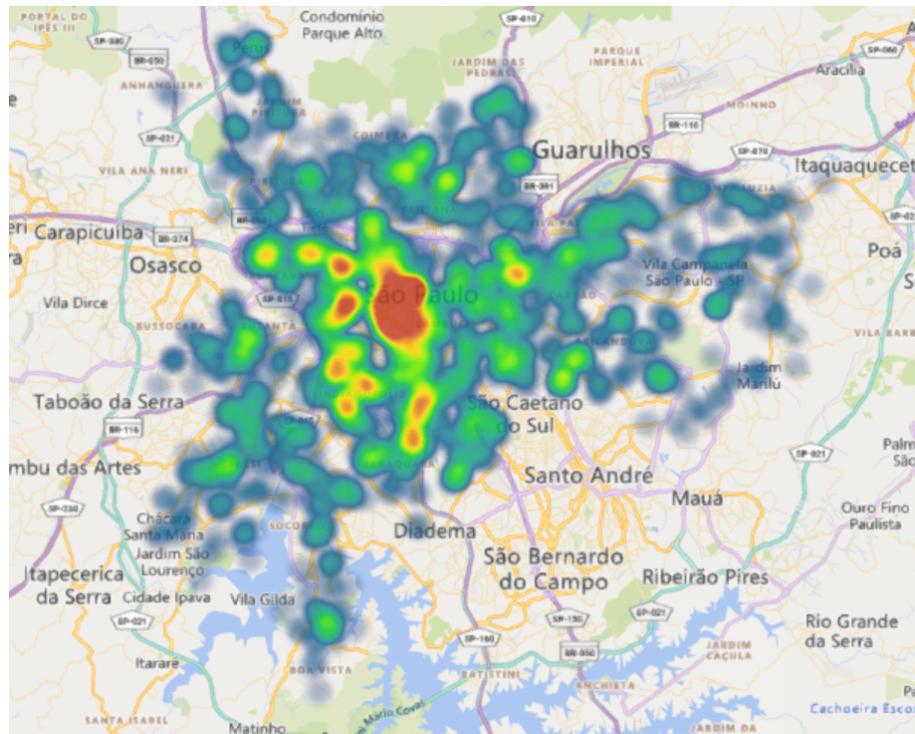
Por meio das Figuras 8 e 9 é possível observar maior concentração da demanda em regiões mais centrais da cidade. Porém, ao observar a Figura 10, que contém um mapa de calor dos pesos das remessas entregues, observa-se que existe grandes áreas com pacotes

Figura 8: Mapa de distribuição de Remessas em São Paulo



Fonte: Autor (2024)

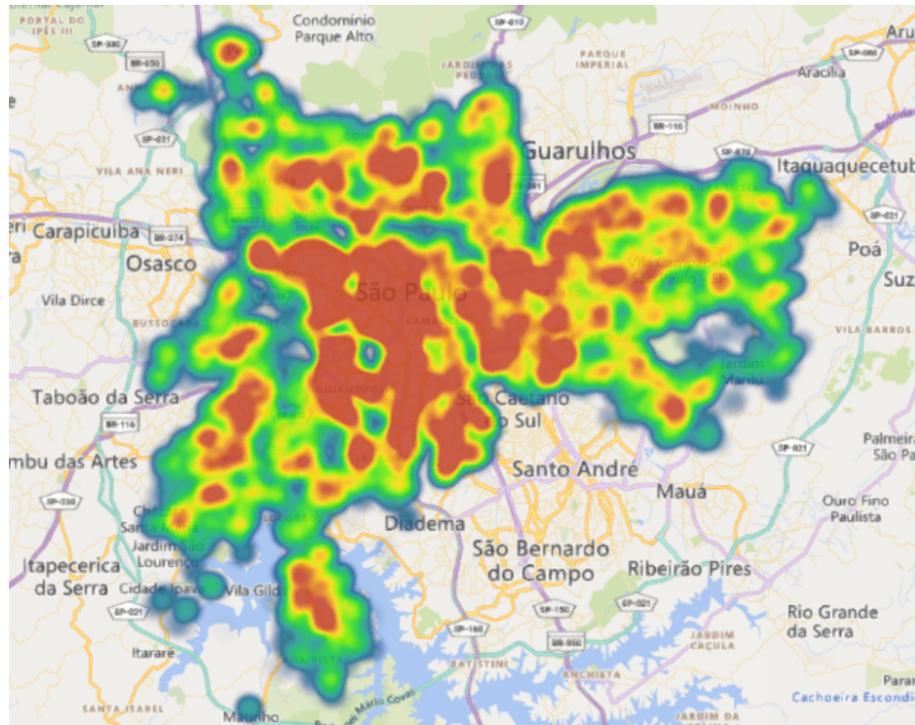
Figura 9: Mapa de Calor da distribuição de Remessas em São Paulo



Fonte: Autor (2024)

mais pesados, indicando que tais regiões precisarão de uma análise mais detalhada pelo aluno durante suas decisões de escolha de veículos a serem utilizados.

Figura 10: Mapa de Calor da distribuição de Peso por Remessas em São Paulo



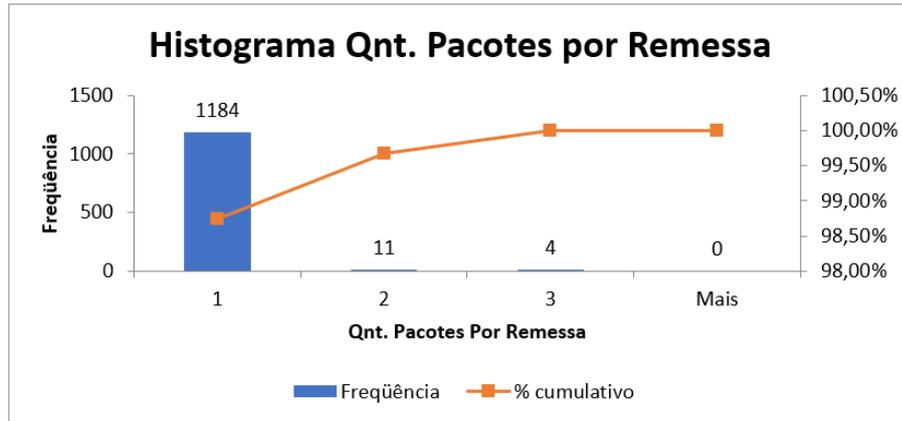
Fonte: Autor (2024)

A Figura 11 apresenta um histograma que ilustra a distribuição da quantidade de pacotes por remessa. Esse histograma fornece informações sobre a variabilidade no tamanho das remessas. Através da análise desse histograma, é possível identificar que a empresa de entrega de *e-commerce* lida principalmente com remessas de pequeno porte contendo majoritariamente 1 pacote por remessa. Essa informação é relevante para a organização das rotas de entrega, pois remessas com características diferentes podem exigir abordagens distintas na sua distribuição.

A Figura 12 apresenta um histograma que representa a distribuição do peso das remessas. Esse histograma é útil para entender a carga de trabalho física enfrentada pela empresa de entrega de *e-commerce*. Ao analisar esse histograma, é possível identificar os intervalos que o peso se concentra nas faixas de 200 gramas à 3 kg, porém ainda assim algumas remessas exigem atenção especial, devido ao seu peso significativamente maior. Essa informação pode ser utilizada para planejar adequadamente a capacidade de carga dos veículos de entrega e garantir uma distribuição eficiente.

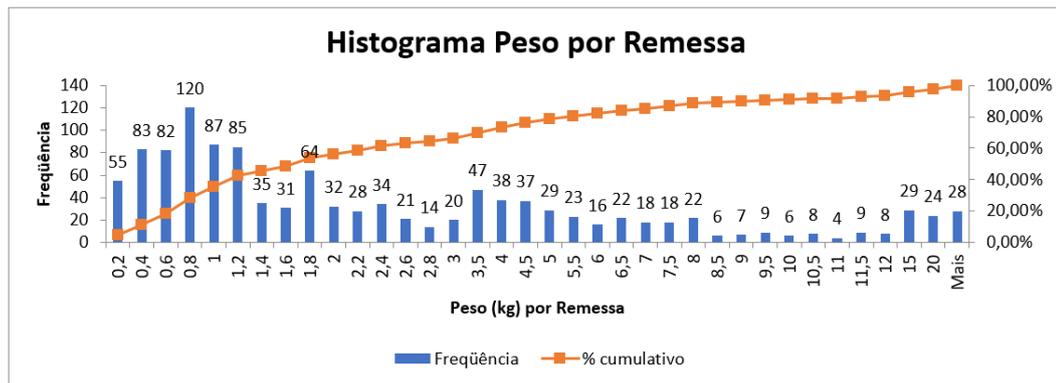
A Tabela 1 contém a estatística descritiva dos dados, por meio dela é possível identi-

Figura 11: Histograma da quantidade de pacotes por remessa



Fonte: Autor (2024)

Figura 12: Histograma do peso (kg) por remessa



Fonte: Autor (2024)

ficar que a quantidade de pacotes por remessa são em média de 1 pacote podendo chegar ao máximo de 3 enquanto que para o peso das remessas em quilogramas tem média de 3,5 kg podendo chegar a 29,9 kg, demonstrando a necessidade de veículos maiores para realizar algumas entregas.

Apesar desses dados, uma informação adicional é crucial para análises mais precisas. A presença de áreas residenciais implica que alguns pacotes são entregues no mesmo endereço, o que causa uma leve alteração nas estatísticas de entrega. Com isso, como visto na Tabela 2 em conjunto das Figuras 13 e 14, a média e mediana da quantidade de pacotes permanece em torno de 1 pacote, porém o peso médio das remessas por endereço é próxima a 5,5 kg podendo chegar a 43 kg, reforçando ainda mais a necessidade de atenção especial em algumas regiões.

Tabela 1: Estatística Descritiva de Remessas

| Qnt. Pacotes Por Remessa | | Peso (kg) Por Remessa | |
|---------------------------------|----------|------------------------------|----------|
| Média | 1.02 | Média | 3.58 |
| Erro Padrão | 0.00 | Erro Padrão | 0.14 |
| Mediana | 1.00 | Mediana | 1.65 |
| Moda | 1.00 | Moda | 0.75 |
| Desvio Padrão | 0.15 | Desvio Padrão | 4.87 |
| Variância Da Amostra | 0.02 | Variância Da Amostra | 23.74 |
| Curtose | 119.14 | Curtose | 7.49 |
| Assimetria | 10.49 | Assimetria | 2.59 |
| Intervalo | 2.00 | Intervalo | 29.94 |
| Mínimo | 1.00 | Mínimo | 0.02 |
| Máximo | 3.00 | Máximo | 29.96 |
| Soma | 1,218.00 | Soma | 4,287.46 |
| Contagem | 1,199.00 | Contagem | 1,199.00 |

Fonte: Autor (2024)

Tabela 2: Estatística Descritiva de Remessas Por Endereço

| Qnt. Pacotes Por Endereço | | Peso (kg) por Endereço | |
|----------------------------------|----------|-------------------------------|----------|
| Média | 1,30 | Média | 5,47 |
| Erro padrão | 0,03 | Erro padrão | 0,23 |
| Mediana | 1,00 | Mediana | 2,26 |
| Moda | 1,00 | Moda | 0,86 |
| Desvio padrão | 0,86 | Desvio padrão | 6,97 |
| Variância da amostra | 0,74 | Variância da amostra | 48,64 |
| Curtose | 27,79 | Curtose | 5,74 |
| Assimetria | 4,58 | Assimetria | 2,24 |
| Intervalo | 9,00 | Intervalo | 43,06 |
| Mínimo | 1,00 | Mínimo | 0,02 |
| Máximo | 10,00 | Máximo | 43,08 |
| Soma | 1.169,00 | Soma | 4.905,03 |
| Contagem | 896,00 | Contagem | 896,00 |

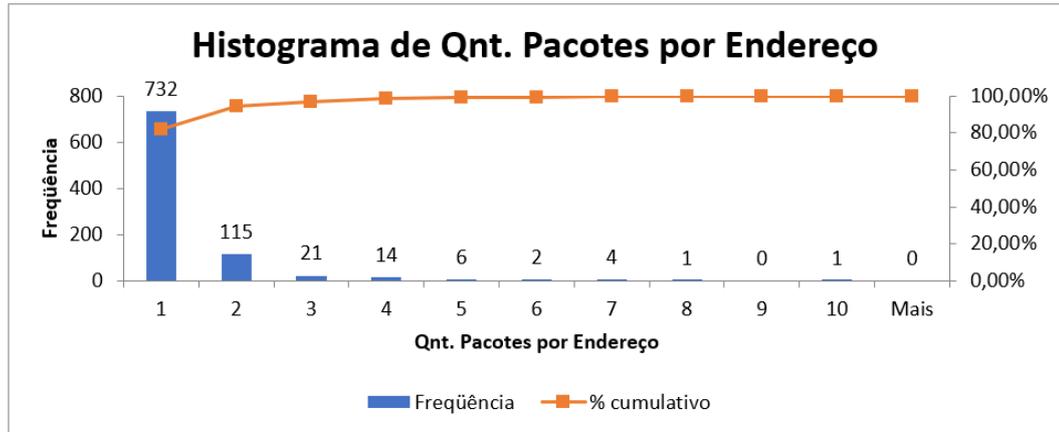
Fonte: Autor (2024)

A partir dessas figuras e tabelas, é possível perceber a complexidade e a diversidade dos dados envolvidos na eficiência das rotas de entrega da empresa que devem ser considerados pelos alunos em seu processo de decisão.

4.2.2 Veículos considerados na Ferramenta

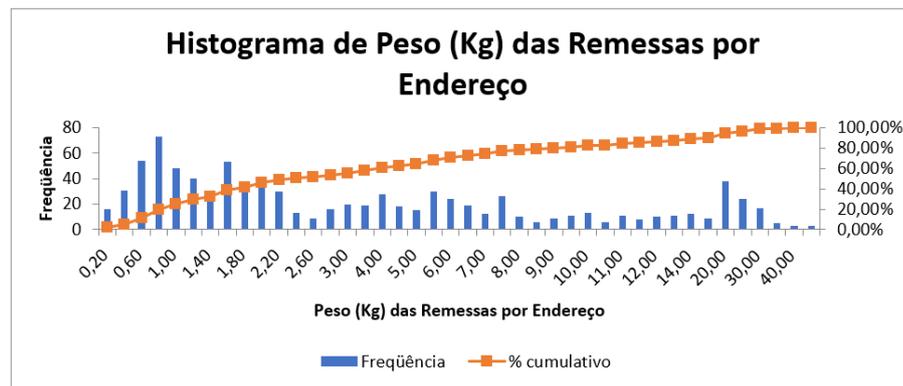
No processo de entrega, é fundamental considerar os veículos utilizados para o transporte dos produtos desde o depósito até os satélites, assim como para atender os clientes. Neste estudo de caso, foram adotados diferentes tipos de veículos, levando em conta as necessidades e características específicas de cada etapa do processo logístico. A primeira

Figura 13: Histograma da quantidade de Pacotes por Endereço



Fonte: Autor (2024)

Figura 14: Histograma do peso (kg) por Endereço



Fonte: Autor (2024)

etapa do transporte, que envolve a viagem do depósito até os satélites, é realizada por caminhões cargueiros de 5,6 toneladas de capacidade útil de carga do modelo *Volkswagen Delivery 9.170* apresentado na Figura 15. Esses caminhões são escolhidos devido à sua capacidade de carga e robustez, permitindo o transporte eficiente e seguro dos produtos entre os locais de armazenamento e distribuição.

Já nos satélites, que representam pontos intermediários entre o depósito e a entrega final ao cliente, são utilizados diferentes tipos de veículos, levando em consideração as particularidades de cada localidade e a necessidade de agilidade e flexibilidade na entrega. Alguns desses veículos são bicicletas de cargas apresentados por Gonzalez-Calderon et al. (2022).

Uma das opções apresentadas por Gonzalez-Calderon et al. (2022) é o uso de bicicletas

Figura 15: Veículo da FE Volkswagen Delivery 9.170



Fonte: Site oficial do Fabricante Volkswagen
Disponível em: <https://encurtador.com.br/izACH>

Rappi (Figura 16). Essas bicicletas, impulsionadas pela força humana com assistência elétrica e cargas transportadas em apoio carregado nas costas do transportador, são ideais para áreas urbanas com tráfego intenso, permitindo uma maior agilidade na entrega de pacotes menores em curtos trajetos.

Figura 16: Veículo da SE Bicicletas com assistência elétrica Rappi



Fonte: Site oficial do Fabricante Rappi
Disponível em: <https://encurtador.com.br/kmEFY>

Outra opção adotada é o triciclo elétrico do modelo MedEBike também apresentado por Gonzalez-Calderon et al. (2022) na Figura 17, que oferece uma solução sustentável

e eficiente para a entrega em áreas urbanas. Esse tipo de veículo é movido por um motor elétrico, proporcionando uma alternativa ecologicamente correta e de baixo impacto ambiental. Com sua capacidade de carga adequada para atender às demandas dos clientes, o triciclo elétrico é especialmente adequado para trajetos de média distância e áreas urbanas com maior disponibilidade de infraestrutura ciclística.

Figura 17: Veículo da SE Triciclo Elétrico MedEBike



Fonte: Site oficial do Fabricante MedEBike
Disponível em: <https://encurtador.com.br/oxY26>

Por fim, a entrega aos clientes também é realizada por meio de vans movidas a diesel. Essas vans oferecem maior capacidade de carga e são adequadas para atender a demandas de entrega de maior volume em trajetos mais longos. Sua versatilidade permite o transporte eficiente de uma variedade de produtos, atendendo às necessidades específicas de cada cliente. O modelo a ser considerado neste trabalho é o *Sprinter Van 516 Standard TA* da *mercedes-benz*, aqui apelidado apenas de Van a Diesel, apresentado na Figura 18.

A Tabela 3 contém algumas informações importantes sobre os veículos a serem utilizados no trabalho extraídos do trabalho de Gonzalez-Calderon et al. (2022) e fichas técnicas fornecidas pelos fabricantes. Os parâmetros de capacidade e custos por hora e quilometro foram estimados relacionando dados extraídos através de tabelas de frete (TRC, 2023) com os dados de pacotes fornecidos pela empresa estudada e as informações dos veículos, sendo os principais custos fixos diluídos no custo por hora do veículo, sendo elas o pagamento da equipe e manutenções, ambas tendo seus valores aproximadamente proporcionais ao tempo de uso dos veículos.

Figura 18: Veículo da SE Sprinter Van 516 Standard TA



Fonte: Site oficial do Fabricante Mercedes-benz
Disponível em: <https://encurtador.com.br/jlyR9>

Tabela 3: Tabela de Características de veículos Usados no DSS

| Veículo | MedeBike | Rappi | Van a Diesel | Volkswagen |
|------------------|----------|-------|--------------|------------|
| Capacidade (pct) | 30 | 15 | 50 | 450 |
| Custo por Km | 0,35 | 0,19 | 0,94 | 1,89 |
| Custo por Hr | 29,25 | 29,25 | 42,43 | 81,69 |

Fonte: Adaptado de Gonzalez-Calderon et al. (2022), Fabricantes dos modelos e TRC (2023).

4.3 Modelagem Matemática Para o Problema 2E-CVRP Aplicado a entrega de E-commerce

A modelagem do 2E-CVRP para entregas de *e-commerce* segue a estrutura da formulação baseadas em arcos de Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013), baseada em um grafo direto, como descrito na secção 2.1.2. Para atender as característica da logística de *e-commerce*, além do conjunto de Cliente C a serem atendidos pelos satélites, também um novo conjunto é considerado visto que clientes de demandas maiores que as capacidades dos veículos dos satélites ou mais distantes que qualquer satélite possa alcançar devem ser atendidos diretamente pelo depósito e fazem parte do conjunto C^d . Assim, os arcos $\mathcal{A} = A_1 \cup A_2$ permanecem como no modelo original, com exceção dos arcos da FE que passam a ser formadas por $A_1 = \{(i, j) | i, j \in \{0\} \cup \mathcal{S} \cup C^d, i \neq j\}$, contendo as ligações entre o depósito central, os satélites e os clientes a serem atendidos diretamente pelo depósito.

Dessa forma, são adicionados os seguintes elementos à formulação de Jepsen, Spoo-

rendonk e Ropke (2013).

Conjuntos adicionais do problema

- \mathcal{C}^d : Conjunto de Clientes atendidos diretamente pelo Centro de Distribuição.

Parâmetros adicionais

- d_{ijs} : distância percorrida com veículo do satélite s no arco (i, j)
- t_{ijs} : tempo decorrido com veículo do satélite s no arco (i, j)
- D_s : Distância máxima de viagens que a frota de veículos do satélite s pode executar
- T_s : Tempo máximo de viagens que a frota de veículos do satélite s pode executar

O Modelo matemático passa a ser:

$$\text{Minimizar } \sum_{k \in K_1} \sum_{(i,j) \in A_1} c_{ij} x_{ijk} + \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} \sum_{k \in K^s} \sum_{r \in [1, m_s]} c_{ij} y_{ijskr} + \sum_{k \in K_1} \sum_{s \in \mathcal{S}} h_s w_{sk} \quad (4.1)$$

sujeito à

$$\sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk} = \sum_{(j,i) \in A_1} x_{jik}, \quad i \in \{0\} \cup \mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d, k \in K_1 \quad (4.2)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk} \leq 1, \quad i \in \{0\} \cup \mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d, k \in K_1 \quad (4.3)$$

$$u_{ik} - u_{jk} + |\mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d| x_{ijk} \leq |\mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d| - 1, \quad i, j \in \mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d, i \neq j, k \in K_1 \quad (4.4)$$

$$w_{jk} \leq Q_1 \sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk}, \quad j \in \mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d, k \in K_1 \quad (4.5)$$

$$\sum_{i \in \mathcal{S} \cup \mathcal{C}^d} w_{ik} \leq Q_1, \quad k \in K_1 \quad (4.6)$$

$$w_{jk} = d_j \sum_{(i,j) \in A_1} x_{ijk}, \quad j \in \mathcal{C}^d, k \in K_1 \quad (4.7)$$

$$\sum_{k \in K_1} w_{sk} = \sum_{(j,s) \in A_2} f_{sjs}, \quad s \in \mathcal{S} \quad (4.8)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_2} y_{ijskr} = \sum_{(j,i) \in A_2} y_{jiskr}, \quad s \in \mathcal{S}, k \in K^s, r \in [1, m_s] \quad (4.9)$$

$$\sum_{(s,j) \in A_2} y_{sjs} \leq m_s, \quad s \in \mathcal{S} \quad (4.10)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_2} d_{ijs} y_{sjs} \leq D_s, \quad s \in \mathcal{S} \quad (4.11)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_2} t_{ijs} y_{sjs} \leq T_s, \quad s \in \mathcal{S} \quad (4.12)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} \sum_{k \in K^s} \sum_{r \in [1, m_s]} y_{ijskr} = 1, \quad j \in \mathcal{C} \quad (4.13)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(j,i) \in A_2} f_{jis} - \sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{(i,j) \in A_2} f_{ijs} = d_i, \quad j \in \mathcal{C} \quad (4.14)$$

$$f_{ijs} \leq Q_s y_{ijs}, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (4.15)$$

$$f_{ijs} \geq 0, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (4.16)$$

$$w_{sk} \geq 0, \quad k \in K_1, s \in \mathcal{S} \quad (4.17)$$

$$x_{ijl} \in \mathbb{B}, \quad (i,j) \in A_1, s \in \mathcal{S} \quad (4.18)$$

$$y_{ijs} \in \mathbb{B}, \quad (i,j) \in A_2, s \in \mathcal{S} \quad (4.19)$$

$$u_{sk} \in \mathbb{Z}^+, \quad k \in K_1, s \in \mathcal{S} \quad (4.20)$$

A função objetivo (4.1) tem como objetivo minimizar os custos totais relacionados ao roteamento e manuseio. As restrições numeradas de (4.2) a (4.6) se referem exclusivamente à primeira camada do problema. A Restrição (4.2) garante a conservação do fluxo para cada veículo de transferência de estoque na primeira camada em cada um dos satélites. A Restrição (4.3) impõe a restrição de que cada veículo na primeira camada deve visitar cada satélite no máximo uma única vez. A Restrição (4.4) evita a formação de sub-rotas, enquanto a Restrição (4.5) estabelece que o fluxo de depósito para o satélite s pertencente ao conjunto \mathcal{S} por meio do veículo k pertencente ao conjunto K_1 só pode ser positivo se o veículo k for utilizado. A Restrição (4.6) é responsável por impor as restrições de capacidade para os veículos FE.

As Restrições (4.7) e (4.8) têm a função de interligar o primeiro e o segundo nível do problema e estabelecer que o fluxo total do depósito para o satélite s deve ser igual à demanda total atendida pelo mesmo, além de garantir atendimento de todos os clientes.

As restrições numeradas de (4.9) a (4.15) modelam as rotas SE do problema. A Restrição (4.9) é responsável por garantir a conservação do fluxo em cada nó SE. As Restrições (4.10) e (4.11) limitam o número de veículos SE saindo de cada satélite e a distância percorrida em cada uma delas, enquanto as Restrições (4.13) e (4.14) garantem que cada cliente seja visitado exatamente uma vez e que as demandas do cliente sejam atendidas. A Restrição (4.14) também proíbe a presença de sub-rotas, enquanto a Restrição (4.15) impõe as restrições de capacidade para os veículos SE.

Por fim, as Restrições (4.16) a (4.20) definem os domínios das variáveis.

4.4 Heurística e seu desempenho

Para a solução do problema em questão, foi desenvolvido uma heurística a ser utilizada no Sistema de apoio à Decisão (DSS) para resolver o 2E-CVRP. Essa heurística foi avaliada com base em *benchmark* de 54 instâncias utilizadas por Jie et al. (2019) de tamanho mediano que foram escolhidos para representar uma região da cidade. É importante ressaltar que essas instâncias não abrangem todas as características existentes para a entrega de *e-commerce*, tais como tempo máximo de trabalho diário e distância máxima de autonomia, além disso, todos os clientes possuem demanda que os veículos da segunda camada conseguem atender. No entanto, elas foram utilizadas para fornecer uma avaliação preliminar da eficiência da heurística em termos de tempo computacional e solução.

4.4.1 Descrição da heurística

A heurística utilizada no caso em questão é dividida em duas etapas principais. A primeira etapa é construtiva, onde os clientes são designados para satélites levando em consideração o critério de proximidade e a capacidade dos satélites, caso exista. Em seguida, o método de inserção mais barata é utilizado para criar rotas em cada satélite. A Figura 19 contém o Pseudocódigo da heurística construtiva, em que a função “Tamanho” retorne o tamanho de uma lista.

Para os satélites que possuem uma demanda acumulada maior do que a capacidade dos veículos da primeira camada (FE), são criadas rotas diretas do depósito aos satélites. Para as demandas excedentes e clientes que devem ser atendidos diretamente pelo depósito, o método de inserção é utilizado para finalizar as rotas.

A segunda etapa da heurística consiste em uma busca local utilizando o operador de troca para trocar grupos de clientes entre as rotas. Novamente, o método de inserção é utilizado para identificar a posição em que os clientes devem ser inseridos nas rotas, de forma a adicionar o menor custo possível.

A busca local segue uma política de primeira melhoria, ou seja, em cada iteração, caso haja uma melhoria, a iteração é encerrada e inicia-se a próxima. O procedimento de busca continua enquanto iterações obtiverem melhorias ou até que um limite de tempo preestabelecido seja alcançado.

Figura 19: Pseudocódigo Heurística Construtiva

Pseudo-Código da Heurística Construtiva
Inputs: S, C, m_s, Q2, d_i, C_ij
Outputs: Rotas, qnt_rotas_s, Demanda_s

```

1 Início
2 // Designar Clientes em Satélites
3 Custer_s = [[] for s in S]
4 Para cada i em C faça
5   cost_i = inf
6   s_ = inf
7   Para cada s em S faça:
8     Se C_ij[i,s] < cost_i faça
9       cost_i = C_ij[i,s]
10      s_ = s
11   Fim Se
12 Fim Para
13 Custer_s[s_].add(i)
14 Fim Para
15 // Gerar Solução Inicial com Metodo de inserção
16 Rotas = []
17 qnt_rotas_s = [0 para cada s em S]
18 Para cada s em S faça:
19   Enquanto Tamanho(Custer_s[s]) > 0 e qnt_rotas_s[s] <= m_s[s] faça:
20     Rota = [s, s]
21     Peso = 0
22     MelhorCusto = inf
23     MelhorCliente = inf
24     MelhorPosicao = int
25     Para cada i em Custer_s[s] faça:
26       Para posicao = 1 até Tamanho(Rota)-1 faça:
27         custo = d_ij[Rota[posicao-1], i] + d_ij[i, Rota[posicao]] - d_ij[Rota[posicao-1], Rota[posicao]]
28         Se custo < MelhorCusto e Peso + d_ij[i] <= Q2 faça:
29           MelhorCusto = custo
30           MelhorCliente = i
31           MelhorPosicao = posicao
32       Fim Se
33     Fim Para
34     Fim Para
35     Se MelhorCliente != inf faça:
36       Rota.inserir(MelhorPosicao, MelhorCliente)
37       Peso = Peso + d_i[MelhorCliente]
38       Custer_s[s].remover(MelhorCliente)
39     Caso Contrário faça:
40       Rotas.add(Rota)
41       Rota = [s, s]
42       Demanda_s[s] = Demanda_s[s] + Peso
43       Peso = 0
44       qnt_rotas_s[s] = qnt_rotas_s[s] + 1
45     Fim Se
46   Fim Enquanto
47
48   Se Tamanho(Rotas) > 2 faça:
49     Rotas.add(Rota)
50     qnt_rotas_s[s] = qnt_rotas_s[s] + 1
51   Fim Se
52
53   Se qnt_rotas_s[s] < m_s[s] faça:
54     Rotas.add([s, s])
55     qnt_rotas_s[s] = qnt_rotas_s[s] + 1
56   Fim Se
57 Fim Para
58
59 Fim

```

Fonte: Autor (2024)

Em cada iteração, para cada par de rotas, observa-se, para cada par de clientes em cada rota, se a troca dos pares de rotas gera uma melhoria e respeita as restrições dos veículos. Caso esses pares de clientes não gerem melhoria, para o mesmo par de rotas,

testa-se a troca de um cliente de cada rota.

Durante as buscas por pares de clientes, se uma das rotas tiver menos de dois clientes, ela realizará uma mudança com apenas um ou nenhum cliente.

Após testar todos os pares de rotas, busca-se, em cada trio de rotas, se existe alguma troca de um cliente por rota que resulte em melhoria, encerrando a iteração em sequência.

Na etapa que considera o trio de rotas, caso até duas rotas estejam vazias, elas são avaliadas, recebendo um dos clientes das demais rotas.

Durante a avaliação de pares e trios de rotas, caso algum satélite tenha disponibilidade para mais viagens, uma nova rota vazia é considerada na heurística, a fim de garantir a avaliação de novas rotas na busca local.

Uma troca entre rotas é considerada uma melhoria se o custo resultante do par ou trio de rotas for menor do que o custo anterior. Caso as rotas tenham origem em satélites diferentes, as rotas da FE são recalculadas utilizando o método construtivo. Nessa avaliação de melhoria, tanto o custo original quanto o custo resultante da troca são considerados na decisão final.

O pseudocódigo descrito na Figura 20 apresenta o procedimento da heurística de busca local, fornecendo uma representação algorítmica das etapas e operações envolvidas no processo. As funções de troca usadas estão descritas nos Pseudocódigos das Figuras 21, 22 e 23.

A operação de troca entre três rotas são realizadas mudando um cliente de cada rota, tendo a avaliação de troca realizada conforme o Pseudocódigo da Figura 24.

4.4.2 Desempenho da heurística

Para avaliar o desempenho da heurística, foram utilizadas 54 instâncias com 21 a 50 clientes e 2 a 4 satélites. Inicialmente, as instâncias foram resolvidas utilizando o modelo matemático de Jepsen, Spoorendonk e Ropke (2013), programado em *Python* v13.11 com o solver *Gurobi* versão 9.1.2, com limite de tempo de uma hora. Foram identificados os melhores incumbentes alcançados pelo solver dentro desse limite, juntamente com o *best bound*, que é o limite inferior da solução relaxada do problema.

Em seguida, as instâncias foram resolvidas pela heurística programada na mesma versão de *Python*. Os valores obtidos foram tabulados juntamente com as soluções e tempos computacionais fornecidos por Jie et al. (2019).

Figura 20: Pseudocódigo Heurística Busca Local

Pseudo-Código da Heurística Busca Local
Inputs: Rotas, qnt_rotas_s, Demanda_s, S, C, m_s, Q2, d_i, C_ij
Outputs: Rotas

```

1 Melhoria = Verdadeiro
2 Enquanto Melhoria faça
3     Melhoria = Falso
4
5     Para cada idx1, r1 em Rotas[0:-1] faça
6         Para cada idx2, r2 em Rotas[idx1+1:] faça
7
8             // Verificar Melhoria com Troca do Tipo 1 por 1
9
10            Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s = Troca1por1(r1, r2, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij)
11            Se Melhoria faça
12                Rotas[idx1] = newr1
13                Rotas[idx2] = newr2
14                Demanda_s = newDemanda_s
15                Vá para 2
16            Fim Se
17
18            // Verificar Melhoria com Troca do Tipo 2 por 2
19
20            Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s = Troca2por2(r1, r2, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij)
21            Se Melhoria faça
22                Rotas[idx1] = newr1
23                Rotas[idx2] = newr2
24                Demanda_s = newDemanda_s
25                Vá para 2
26            Fim Se
27        Fim Para
28    Fim Para
29    Para cada idx1, r1 em Rotas[0:-2] faça
30        Para cada idx2, r2 em Rotas[idx1:-1] faça
31            Para cada idx3, r3 em Rotas[idx2:] faça
32                // Verificar Melhoria com Troca de 3 rotas
33                Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s = Troca3rotas(r1, r2, r3, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij)
34                Se Melhoria faça
35                    Rotas[idx1] = newr1
36                    Rotas[idx2] = newr2
37                    Rotas[idx3] = newr3
38                    Demanda_s = newDemanda_s
39                Vá para 2
40            Fim Se
41        Fim Para
42    Fim Para
43 Fim Enquanto
44 Fim Enquanto
45
46 Fim

```

Fonte: Autor (2024)

A Tabela 4 apresenta um resumo dos resultados e a descrição básica das instâncias. A coluna "instância" contém o nome da instância, "nS" e "nC" representam a quantidade de satélites e clientes, respectivamente. Logo abaixo da seção "Resultados do Modelo",

Figura 21: Pseudocódigo Heurística Troca 1 por 1

| |
|--|
| Pseudo-Código: Troca1por1 |
| Inputs: r1, r2, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij |
| Outputs: Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s |

```

1 INICIO
2 newDemanda_s = Demanda_s
3 s1 = r1[0]
4 s2 = r2[0]
5 CustoR1 = CalcularCusto(r1)
6 CustoR2 = CalcularCusto(r2)
7 Se s1=s2 faça
8     CustoFE = 0
9 Caso contrario:
10    CustoFE = CalculoRotaFE(Demanda_s)
11 Fim Se
12 Para cada pos_i, i em r1[1-1] faça
13     Para cada pos_j, j em r2[1-1] faça
14         // Verificar restrição de capacidade
15         Se Soma(d_i[r1]) - d_i[i] + d_i[j] <= Q2 e Soma(d_i[r2]) - d_i[j] + d_i[i] <= Q2 faça
16             newr1 = r1
17             newr2 = r2
18             newCustoR1 = CustoR1 - (C_ij[r1[pos_i-1], i]+C_ij[i, r1[pos_i+1]])
19             newCustoR2 = CustoR2 - (C_ij[r2[pos_j-1], i]+C_ij[i, r2[pos_j+1]])
20             newr1.remove(i)
21             newr2.remove(j)
22             newPos_i = insertMethod(newr1, j)
23             newPos_j = insertMethod(newr2, i)
24             newCustoR1 = newCustoR1 - (C_ij[newr1[newPos_i-1], j]+C_ij[j, newr1[newPos_i+1]])
25             newCustoR2 = newCustoR2 - (C_ij[newr2[newPos_j-1], i]+C_ij[i, newr2[newPos_j+1]])
26             Se s1=s2 faça
27                 newCustoFE = 0
28             Caso contrario:
29                 newDemanda_s[s1] = Demanda_s[s1] + d_i[j] - d_i[i]
30                 newDemanda_s[s2] = Demanda_s[s2] - d_i[j] + d_i[i]
31                 newCustoFe = CalculoRotaFE(newDemanda_s)
32             Fim Se
33             Se newCustoR1+newCustoR2+newCustoFe < CustoR1+CustoR2+CustoFe faça
34                 Melhoria = Verdadeiro
35                 Vá para 41
36             Fim Se
37         Fim Para
38     Fim Para
39 Fim Para
40
41 Fim

```

Fonte: Autor (2024)

as colunas "Incumbent", "Best Bound" e "Tempo (s)" mostram os resultados do modelo matemático resolvido. Na seção "Resultados Heurística", as colunas "Incumbent", "Gap MILP" e "Tempo (s)" exibem a melhor solução encontrada pela heurística, o *gap* calculado

Figura 22: Pseudocódigo Heurística Troca 2 por 2

Pseudo-Código: Troca2por2
Inputs: r1, r2, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij
Outputs: Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s

```

1 INICIO
2 newDemanda_s = Demanda_s
3 s1 = r1[0]
4 s2 = r2[0]
5 CustoR1 = CalcularCusto(r1)
6 CustoR2 = CalcularCusto(r2)
7 Se s1=s2 faça
8     CustoFE = 0
9 Caso contrario:
10     CustoFE = CalculoRotaFE(Demanda_s)
11 Fim Se
12 Combinacoes_1 = Combinar2a2(r1[1:-1])
13 Combinacoes_2 = Combinar2a2(r2[1:-1])
14 Para cada Comb1 em Combinacoes_1 faça
15     Para cada Comb2 em Combinacoes_2 faça
16         // Verificar restrição de capacidade
17         Se Soma(d_i[r1]) - soma(d_i[Comb1]) + soma(d_i[Comb2]) <= Q2 e Soma(d_i[r2]) - soma(d_i[Comb1]) + soma(d_i[Comb2]) <= Q2 faça
18             newr1 = r1
19             newr2 = r2
20             Para Cada i em Comb1 faça
21                 newr1.remove(i)
22             Fim Para
23             Para Cada j em Comb2 faça
24                 newr2.remove(j)
25                 newr2.remove(j)
26             Fim Para
27             Para Cada j em Comb2 faça
28                 newPos_j = insertMethod(newr1, j)
29                 newr1.inserir(newPos_j, j)
30             Fim Para
31             Para Cada i em Comb1 faça
32                 newPos_j = insertMethod(newr2, i)
33                 newr2.inserir(newPos_j, i)
34             Fim Para
35             newCustoR1 = CalcularCusto(newr1)
36             newCustoR2 = CalcularCusto(newr2)
37             Se s1=s2 faça
38                 newCustoFE = 0
39             Caso contrario:
40                 newDemanda_s[s1] = Demanda_s[s1] + soma(d_i[Comb2]) - soma(d_i[Comb1])
41                 newDemanda_s[s2] = Demanda_s[s2] - soma(d_i[Comb2]) + soma(d_i[Comb1])
42                 newCustoFe = CalculoRotaFE(newDemanda_s)
43             Fim Se
44             Se newCustoR1+newCustoR2+newCustoFe < CustoR1+CustoR2+CustoFe faça
45                 Melhoria = Verdadeiro
46                 Vá para 48
47             Fim Se
48         Fim Se
49     Fim Para
50 Fim Para
51
52 Fim

```

Fonte: Autor (2024)

como a diferença entre a solução da heurística e o *incumbente* do modelo matemático dividido pelo *incumbente* do modelo matemático, e o tempo necessário para a heurística resolver o problema. Por fim, as colunas "Incumbent", "Tempo (s)" e "GAP" abaixo da seção "Resultados Literatura" apresentam a solução de Jie et al. (2019) para a instância e o *gap* representa a diferença entre o resultado da heurística e a solução da literatura.

As Figuras 25, 26, 27 e 28 contêm o resumo gráfico em histograma dos resultados da

Figura 23: Pseudocódigo Heurística Troca 3 rotas

Pseudo-Código: Troca3rotas
Inputs: r1, r2, r3, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij
Outputs: Melhoria, newr1, newr2, newDemanda_s

```

1 INICIO
2 newDemanda_s = Demanda_s
3 s1 = r1[0]
4 s2 = r2[0]
5 s3 = r3[0]
6 CustoR1 = CalcularCusto(r1)
7 CustoR2 = CalcularCusto(r2)
8 CustoR3 = CalcularCusto(r3)
9 Se s1=s2 e s2=s3 faça
10     CustoFE = 0
11 Caso contrario:
12     CustoFE = CalculoRotaFE(Demanda_s)
13 Fim Se
14 CustoParcial = CustoR1 + CustoR2 + CustoR3 + CustoFE
15 Para cada pos_i, i em r1[1-1] faça
16     Para cada pos_j, j em r2[1-1] faça
17         Para cada pos_z, z em r3[1-1] faça
18             // Avaliar troca: r1 >> r2 >> r3 >> r1
19             Melhoria, newr1, newr2, newr3 = AvaliarTroca3rotas(r1, r2, r3, i, j, z, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij, CustoParcial)
20             Se Melhoria faça
21                 Vá para 32
22             Fim Se
23             // Avaliar troca: r1 >> r3 >> r2 >> r1
24             Melhoria, newr1, newr2, newr3 = AvaliarTroca3rotas(r1, r3, r2, i, z, j, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij, CustoParcial)
25             Se Melhoria faça
26                 Vá para 32
27             Fim Se
28         Fim Para
29     Fim Para
30 Fim Para
31
32 Fim

```

Fonte: Autor (2024)

heurística frente ao modelo matemático, o tempo de execução da heurística, o resultado frente a literatura e tempo de execução da heurística da literatura, respectivamente.

A análise dos resultados mostra que o *gap* médio da heurística é de 7,4% com tempo médio de 9,26 segundos, o que são resultados animadores para implementação no sistema, mesmo o *gap* médio estando alto frente ao ideal que seria *gap* de 0%. Todavia, a análise dos histogramas mostra que o intervalo de *gap* da heurística tem uma grande variação entre as instâncias, concentrando-se entre 0 e 15%, podendo ainda assim alcançar *gap* maiores que 20%, indicando necessidade de melhoria do procedimento da heurística.

Além disso, o tempo de processamento da heurística varia bastante dentro da margem aceitável de tempo, que seria 30 segundos, mesmo que 5 das 54 instâncias tenham alcançado 32 e 34 segundos, o limite de tempo pode ser empregado para o controlar isso durante uso do DSS.

Figura 24: Pseudocódigo Heurística avaliar Troca 3 rotas

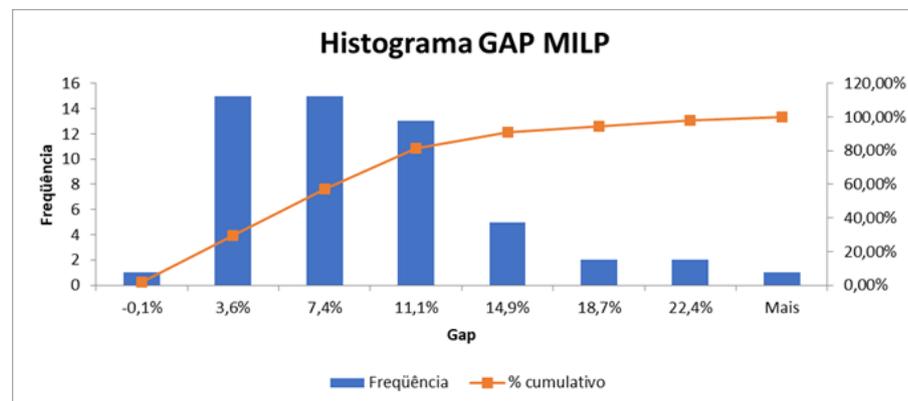
Pseudo-Código: AvaliarTroca3rotas
Inputs: rA, rB, rC, i, j, z, Demanda_s, Q2, d_i, C_ij, CustoParcial
Outputs: Melhoria, newr1, newr2, newr3

```

1 INICIO
2 newr1 = rA
3 newr2 = rB
4 newr3 = rC
5 s1 = r1[0]
6 s2 = r2[0]
7 s3 = r3[0]
8 Se Soma(d_i[r1]) - d_i[i] + d_i[z] <= Q2 e Soma(d_i[r2]) - d_i[j] + d_i[i] <= Q2 e Soma(d_i[r3]) - d_i[z] + d_i[j] <= Q2 faça
9   newr1.remove(i)
10  newr2.remove(j)
11  newr3.remove(z)
12  newPos_i = insertMethod(newr1, z)
13  newPos_j = insertMethod(newr2, i)
14  newPos_z = insertMethod(newr3, j)
15  Se s1=s2 e s2=s3 faça
16    newCustoFE = 0
17  Caso contrario:
18    newDemanda_s[s1] = Demanda_s[s1] + d_i[z] - d_i[i]
19    newDemanda_s[s2] = Demanda_s[s2] + d_i[i] - d_i[j]
20    newDemanda_s[s3] = Demanda_s[s3] + d_i[j] - d_i[z]
21    newCustoFe = CalculoRotaFE(newDemanda_s)
22  Fim Se
23  newCustoR1 = CalcularCusto(newr1)
24  newCustoR2 = CalcularCusto(newr2)
25  newCustoR3 = CalcularCusto(newr3)
26  Se newCustoR1+newCustoR2+newCustoR3+newCustoFe < CustoParcial faça
27    Melhoria = Verdadeiro
28    Vá para 32
29  Fim Se
30 Fim Se
31
32 Fim

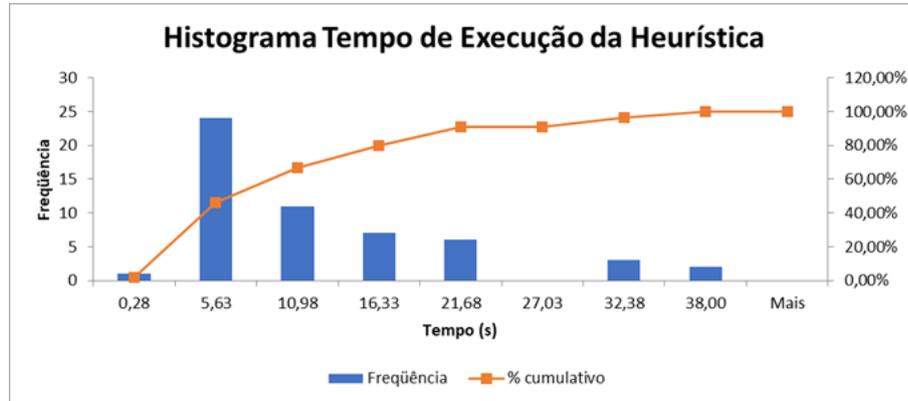
```

Fonte: Autor (2024)

Figura 25: Histograma de *gap* da Heurística

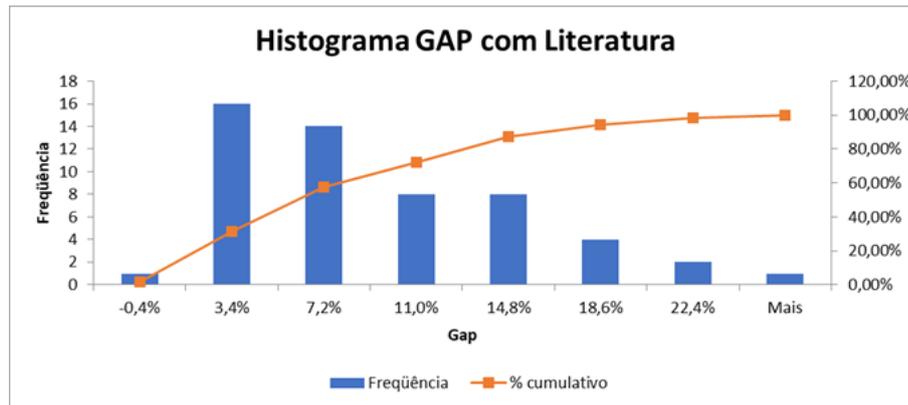
Fonte: Autor (2024)

Figura 26: Histograma do tempo de execução da Heurística



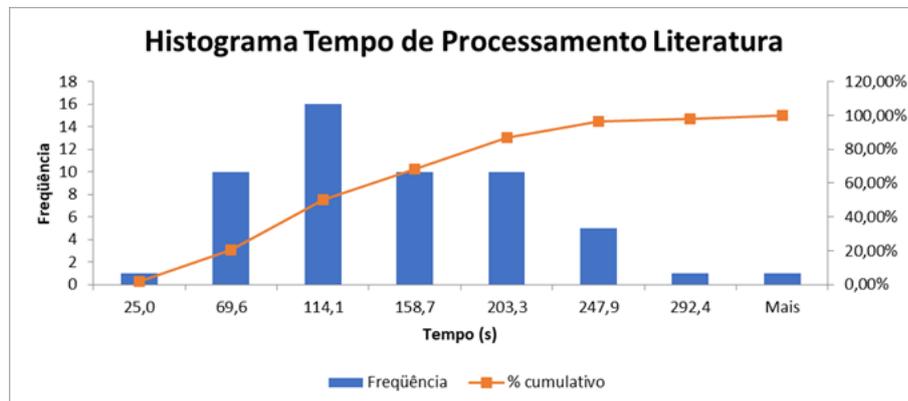
Fonte: Autor (2024)

Figura 27: Histograma de *gap* da Heurística frente literatura



Fonte: Autor (2024)

Figura 28: Histograma de Tempo de Execução de Heurística da literatura



Fonte: Autor (2024)

Por fim, o *gap* frente a literatura é animador também, pois o *gap* médio da heurística frente a literatura também é de 7,4% e o histograma da Figura 27 mostra que o *gap* das instâncias tem concentração mais próxima desse número, mesmo que a cauda do histograma também possa alcançar valores acima de 20%. Em termos de comparação de tempo computacional, a heurística da literatura resolve os problemas em cerca de 126 segundos, o que é mais de 2 minutos de processamento, podendo chegar a mais de 290 segundos de tempo de processamento. Visto isso, a heurística desenvolvida neste trabalho encontra-se em melhor possibilidade de utilização no DSS, apesar de necessitar de melhorias em termos de qualidade de solução.

Tabela 4: Resultado numéricos da heurística

| instância | nS | nC | Resultados do Modelo de Programação Linear | | | Resultados Heurística | | | Resultados Literatura | | |
|-----------------------------|----|----|--|------------|-----------|-----------------------|----------|-----------|-----------------------|-----------|-------|
| | | | Incumbent | Best Bound | Tempo (s) | Incumbent | Gap MILP | Tempo (s) | Incumbent | Tempo (s) | GAP |
| Set2a_E-n22-k4-s10-14 | 2 | 21 | 371.50 | 371.50 | 16.99 | 371.50 | 0.0% | 0.98 | 371.50 | 25.00 | 0.0% |
| Set2a_E-n22-k4-s11-12 | 2 | 21 | 427.22 | 427.22 | 252.47 | 446.05 | 4.4% | 0.65 | 427.22 | 31.00 | 4.4% |
| Set2a_E-n22-k4-s12-16 | 2 | 21 | 386.92 | 386.92 | 141.56 | 441.89 | 14.2% | 0.29 | 392.78 | 66.00 | 12.5% |
| Set2a_E-n22-k4-s6-17 | 2 | 21 | 417.07 | 417.07 | 8.98 | 443.16 | 6.3% | 1.25 | 417.07 | 27.00 | 6.3% |
| Set2a_E-n22-k4-s8-14 | 2 | 21 | 384.96 | 384.96 | 24.62 | 392.92 | 2.1% | 0.77 | 384.96 | 27.00 | 2.1% |
| Set2a_E-n22-k4-s9-19 | 2 | 21 | 455.79 | 455.79 | 120.86 | 499.25 | 9.5% | 0.52 | 470.60 | 47.00 | 6.1% |
| Set2a_E-n33-k4-s1-9 | 2 | 32 | 729.95 | 720.32 | 3600.36 | 749.59 | 2.7% | 1.62 | 730.16 | 159.00 | 2.7% |
| Set2a_E-n33-k4-s14-22 | 2 | 32 | 779.05 | 779.05 | 883.22 | 983.06 | 26.2% | 3.01 | 779.05 | 184.00 | 26.2% |
| Set2a_E-n33-k4-s2-13 | 2 | 32 | 705.20 | 705.20 | 880.06 | 746.52 | 5.9% | 1.59 | 714.63 | 102.00 | 4.5% |
| Set2a_E-n33-k4-s3-17 | 2 | 32 | 696.75 | 682.71 | 3600.35 | 831.24 | 19.3% | 1.07 | 707.48 | 186.00 | 17.5% |
| Set2a_E-n33-k4-s4-5 | 2 | 32 | 756.91 | 726.76 | 3600.44 | 828.96 | 9.5% | 1.88 | 778.74 | 237.00 | 6.4% |
| Set2a_E-n33-k4-s7-25 | 2 | 32 | 743.39 | 743.39 | 783.39 | 800.33 | 7.7% | 7.18 | 756.85 | 205.00 | 5.7% |
| Set2b_E-n51-k5-s11-19-27-47 | 4 | 50 | 527.63 | 498.88 | 3601.47 | 615.90 | 16.7% | 37.73 | 527.63 | 206.00 | 16.7% |
| Set2b_E-n51-k5-s11-19 | 2 | 50 | 607.83 | 552.32 | 3600.87 | 637.39 | 4.9% | 10.28 | 581.64 | 179.00 | 9.6% |
| Set2b_E-n51-k5-s2-17 | 2 | 50 | 578.38 | 550.64 | 3600.87 | 595.08 | 2.9% | 34.33 | 597.49 | 88.00 | -0.4% |
| Set2b_E-n51-k5-s2-4-17-46 | 4 | 50 | 548.31 | 494.29 | 3601.44 | 598.20 | 9.1% | 19.70 | 530.76 | 251.00 | 12.7% |
| Set2b_E-n51-k5-s27-47 | 2 | 50 | 533.55 | 509.79 | 3600.80 | 583.27 | 9.3% | 17.34 | 538.22 | 40.00 | 8.4% |
| Set2b_E-n51-k5-s32-37 | 2 | 50 | 552.28 | 528.57 | 3600.91 | 590.80 | 7.0% | 6.94 | 552.28 | 89.00 | 7.0% |
| Set2b_E-n51-k5-s4-46 | 2 | 50 | 530.76 | 519.25 | 3600.86 | 577.58 | 8.8% | 31.40 | 530.76 | 138.00 | 8.8% |
| Set2b_E-n51-k5-s6-12-32-37 | 4 | 50 | 547.65 | 502.04 | 3601.62 | 585.66 | 6.9% | 8.98 | 531.92 | 152.00 | 10.1% |
| Set2b_E-n51-k5-s6-12 | 2 | 50 | 553.42 | 517.80 | 3600.82 | 567.68 | 2.6% | 30.35 | 554.81 | 104.00 | 2.3% |
| Set2c_E-n51-k5-s11-19-27-47 | 4 | 50 | 533.20 | 504.21 | 3601.50 | 645.60 | 21.1% | 31.52 | 530.76 | 189.00 | 21.6% |
| Set2c_E-n51-k5-s11-19 | 2 | 50 | 612.04 | 557.90 | 3600.85 | 644.72 | 5.3% | 20.60 | 619.81 | 215.00 | 4.0% |
| Set2c_E-n51-k5-s2-17 | 2 | 50 | 602.00 | 553.72 | 3600.79 | 621.14 | 3.2% | 15.33 | 605.62 | 96.00 | 2.6% |
| Set2c_E-n51-k5-s6-12-32-37 | 4 | 50 | 615.24 | 531.86 | 3601.48 | 676.94 | 10.0% | 9.14 | 601.39 | 337.00 | 12.6% |
| Set2c_E-n51-k5-s27-47 | 2 | 50 | 530.76 | 522.03 | 3600.88 | 625.33 | 17.8% | 5.77 | 530.76 | 59.00 | 17.8% |
| Set2c_E-n51-k5-s32-37 | 2 | 50 | 790.98 | 702.94 | 3600.87 | 840.39 | 6.2% | 16.27 | 755.28 | 77.00 | 11.3% |
| Set2c_E-n51-k5-s4-46 | 2 | 50 | 673.34 | 625.78 | 3600.80 | 746.77 | 10.9% | 9.24 | 702.33 | 155.00 | 6.3% |
| Set2c_E-n51-k5-s6-12-32-37 | 4 | 50 | 595.12 | 523.56 | 3601.55 | 654.92 | 10.0% | 12.30 | 567.42 | 151.00 | 15.4% |
| Set2c_E-n51-k5-s6-12 | 2 | 50 | 576.62 | 536.18 | 3600.89 | 598.83 | 3.9% | 9.95 | 567.42 | 95.00 | 5.5% |
| Set3_E-n22-k4-s13-14 | 2 | 21 | 523.06 | 523.06 | 185.41 | 526.15 | 0.6% | 0.32 | 526.15 | 103.00 | 0.0% |
| Set3_E-n22-k4-s13-16 | 2 | 21 | 516.46 | 516.46 | 506.18 | 561.84 | 8.8% | 0.62 | 521.09 | 107.00 | 7.8% |
| Set3_E-n22-k4-s13-17 | 2 | 21 | 490.69 | 490.69 | 124.74 | 496.38 | 1.2% | 0.28 | 496.38 | 56.00 | 0.0% |
| Set3_E-n22-k4-s14-19 | 2 | 21 | 476.40 | 476.40 | 952.08 | 517.80 | 8.7% | 0.36 | 498.80 | 75.00 | 3.8% |
| Set3_E-n22-k4-s17-19 | 2 | 21 | 496.58 | 496.58 | 1683.04 | 524.80 | 5.7% | 1.00 | 512.81 | 89.00 | 2.3% |
| Set3_E-n22-k4-s19-21 | 2 | 21 | 511.18 | 511.18 | 1312.67 | 545.72 | 6.8% | 0.39 | 520.42 | 68.00 | 4.9% |
| Set3_E-n33-k4-s16-22 | 2 | 32 | 666.78 | 636.54 | 3600.35 | 689.83 | 3.5% | 2.51 | 672.17 | 58.00 | 2.6% |
| Set3_E-n33-k4-s16-24 | 2 | 32 | 662.98 | 634.27 | 3600.42 | 747.90 | 12.8% | 1.16 | 666.02 | 115.00 | 12.3% |
| Set3_E-n33-k4-s19-26 | 2 | 32 | 674.86 | 656.23 | 3600.35 | 689.21 | 2.1% | 0.95 | 680.36 | 200.00 | 1.3% |
| Set3_E-n33-k4-s22-26 | 2 | 32 | 677.66 | 661.45 | 3600.37 | 708.27 | 4.5% | 1.14 | 680.37 | 121.00 | 4.1% |
| Set3_E-n33-k4-s24-28 | 2 | 32 | 667.83 | 641.28 | 3600.36 | 677.69 | 1.5% | 1.70 | 670.43 | 88.00 | 1.1% |
| Set3_E-n33-k4-s25-28 | 2 | 32 | 644.01 | 635.87 | 3600.37 | 722.64 | 12.2% | 0.87 | 650.58 | 86.00 | 11.1% |
| Set3_E-n51-k5-s12-18 | 2 | 50 | 694.18 | 647.58 | 3600.81 | 693.16 | -0.1% | 10.60 | 690.59 | 116.00 | 0.4% |
| Set3_E-n51-k5-s12-41 | 2 | 50 | 688.57 | 631.36 | 3600.87 | 704.66 | 2.3% | 3.49 | 683.05 | 123.00 | 3.2% |
| Set3_E-n51-k5-s12-43 | 2 | 50 | 749.24 | 686.08 | 3600.80 | 849.89 | 13.4% | 19.19 | 710.41 | 177.00 | 19.6% |
| Set3_E-n51-k5-s13-19 | 2 | 50 | 560.68 | 531.19 | 3600.90 | 570.12 | 1.7% | 16.63 | 560.73 | 148.00 | 1.7% |
| Set3_E-n51-k5-s13-42 | 2 | 50 | 570.49 | 543.58 | 3600.83 | 618.68 | 8.4% | 5.04 | 564.45 | 87.00 | 9.6% |
| Set3_E-n51-k5-s13-44 | 2 | 50 | 571.20 | 544.34 | 3600.82 | 644.85 | 12.9% | 17.19 | 564.45 | 105.00 | 14.2% |
| Set3_E-n51-k5-s39-41 | 2 | 50 | 741.88 | 673.63 | 3600.81 | 788.26 | 6.3% | 7.15 | 728.54 | 216.00 | 8.2% |
| Set3_E-n51-k5-s40-41 | 2 | 50 | 715.93 | 663.34 | 3600.82 | 730.11 | 2.0% | 12.61 | 723.75 | 177.00 | 0.9% |
| Set3_E-n51-k5-s40-42 | 2 | 50 | 732.08 | 652.74 | 3600.81 | 764.60 | 4.4% | 7.21 | 746.31 | 193.00 | 2.5% |
| Set3_E-n51-k5-s40-43 | 2 | 50 | 755.99 | 687.54 | 3600.82 | 822.11 | 8.7% | 13.56 | 753.19 | 199.00 | 9.1% |
| Set3_E-n51-k5-s41-42 | 2 | 50 | 820.04 | 725.11 | 3600.88 | 857.37 | 4.6% | 13.84 | 771.56 | 132.00 | 11.1% |
| Set3_E-n51-k5-s41-44 | 2 | 50 | 831.25 | 706.61 | 3600.86 | 831.81 | 0.1% | 14.10 | 804.23 | 99.00 | 3.4% |
| Média: | | | | | | | 7.4% | 9.26 | 126.94 | 7.4% | |

Fonte: Autor (2024)

5 O SISTEMA DE APOIO À DECISÃO

Esta seção tem como propósito introduzir o protótipo do Sistema de apoio à Decisão (DSS) desenvolvido neste trabalho, dividindo-se em duas partes. Na primeira parte, são detalhadas as características do protótipo, abrangendo o banco de dados, as telas de interação com usuários, as *APIs* e as tecnologias empregadas. Já na segunda parte, são apresentados os testes de usabilidade do sistema desenvolvido, com o intuito de capturar as percepções dos participantes acerca da qualidade, facilidade de uso e desempenho do sistema.

5.1 Protótipo do DSS

Esta seção dedica-se a apresentar o protótipo do DSS criado. A interface do sistema é composta por três janelas principais. A primeira janela é destinada aos créditos, onde são devidamente reconhecidos os desenvolvedores e apoiadores envolvidos no desenvolvimento e aprimoramento da ferramenta. A segunda janela, denominada de "Setup", permite que um instrutor configure os parâmetros personalizados que serão utilizados pelo usuário participantes de atividades de treinamentos. Por fim, a terceira janela oferece ao usuário diversas alternativas de soluções, possibilitando a análise e avaliação de diferentes rotas e redes logísticas. A utilização dessa plataforma proporciona uma abordagem eficiente e precisa para a resolução de problemas relacionados ao planejamento e otimização logística. Estas janelas se conectam com o banco de dados de entregas e malha viária, além das *APIs* utilizadas para gerenciar dados e soluções de rotas.

5.1.1 Banco de Dados

O sistema em questão utiliza uma estrutura de banco de dados baseada em *JSON* para armazenar e gerenciar os dados relacionados à logística de entregas. O banco de dados é composto por diferentes conjuntos de informações essenciais para o planejamento e otimização logística. Essas informações incluem dados de entrega dos clientes, tais como demandas, pesos de remessas e localizações. Além disso, o banco de dados também armazena informações sobre os depósitos e satélites, como localizações, custos e capacida-

des. Outro conjunto de dados importante é referente aos veículos utilizados nas entregas, contendo informações sobre custos e capacidades específicas de cada veículo. Além dos dados mencionados anteriormente, o banco de dados também é responsável por armazenar informações de distâncias entre pontos. Para isso, é feita uma requisição à *API Leaflet-Route_Machine* do *OpenStreetMap*, que fornece dados geoespaciais e de rotas. Essas informações de distâncias entre os pontos são fundamentais para a tomada de decisões relacionadas às rotas e ao planejamento logístico eficiente.

5.1.2 APIs utilizadas

As *APIs* utilizadas para auxiliar a ferramenta são a *API Leaflet-Route_Machine* do *OpenStreetMap*, responsável por coletar dados geoespaciais dos pontos de entrega e armazenamentos do problema, e a *API* em desenvolvimento neste trabalho responsável por calcular as rotas do problema.

5.1.2.1 API Leaflet-Route_Machine do OpenStreetMap

Este estudo apresenta o uso da *API Leaflet-Route_Machine* do *OpenStreetMap* em um sistema de planejamento de rotas e logística. A *API Leaflet-Route_Machine* é uma extensão da biblioteca *Leaflet*, que é uma biblioteca *JavaScript* amplamente utilizada para a criação de mapas interativos em páginas web. O *OpenStreetMap*, por sua vez, é um projeto colaborativo de mapeamento geoespacial de código aberto.

A *API Leaflet-Route_Machine* é uma ferramenta essencial para calcular rotas entre diferentes pontos geográficos usando os dados do *OpenStreetMap*. Essa *API* possibilita o acesso a informações detalhadas sobre ruas, estradas e outros elementos geográficos presentes no mapa. Isso viabiliza a determinação de rotas precisas com base nas informações disponíveis, desempenhando assim um papel fundamental na otimização do planejamento de rotas e logística dentro do sistema.

5.1.2.2 API de Roteirização

A *API* de roteirização desenvolvida neste trabalho desempenha o papel de calcular rotas com base nos dados fornecidos pela interface de roteirização. A *API* recebe dados em formato *JSON*, incluindo uma matriz de distâncias, informações sobre satélites, clientes e veículos. Utilizando a heurística desenvolvida neste trabalho, a *API* realiza o processo de roteirização, otimizando as rotas de entrega. Com base nos dados fornecidos, a *API*

calcula as rotas ideais, levando em consideração fatores como custo, tempo e ocupação dos veículos e, por fim, retorna os resultados para a interface de roteamento do sistema descrita na secção 5.1.3.3.

5.1.3 Interfaces

O sistema é composto por três interfaces principais. A primeira exhibe os créditos (“HOME”) aos desenvolvedores e apoiadores do sistema. A segunda interface é a área de preparação (“SETUP”), onde o usuário define os parâmetros e configurações necessárias. A terceira interface é a área de treinamento (“2E-CVRP”), onde o usuário pode construir e avaliar alternativas de soluções para rotas e rede logística.

5.1.3.1 Interface de Créditos

A Figura 29 apresenta a tela principal do sistema. Nela há a Barra lateral, presente em todas as janelas do sistema, contendo os links para todas as janelas do sistema e um botão de minimização e maximização da barra lateral. A barra lateral possui tamanho dinâmico quando está no modo minimizado, em que apresenta somente os ícones dos links e enquanto o cursor do mouse se sobrepõe a barra ela maximiza para o tamanho apresentado na Figura. O conteúdo principal da página contém o Nome do sistema e os colaboradores de desenvolvimento.

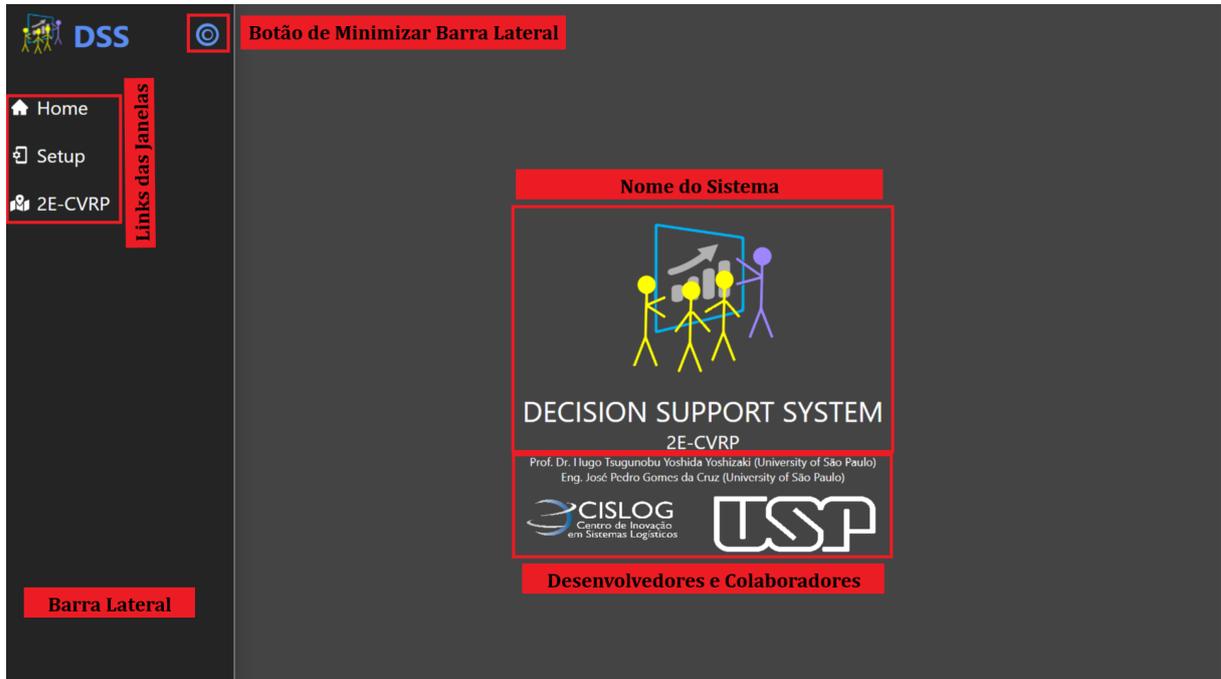
5.1.3.2 Interface de Preparação

O corpo principal da interface de Preparação (“Setup”) é composto por três grandes áreas apresentadas na Figura 30. A seção (a) contém as configurações gerais dos dados e a (b) permite que instrutor observe todas as regiões e satélites, além de selecionar as regiões a serem trabalhadas pelos participantes de treinamentos.

A primeira delas (a) refere-se as configurações gerais dos dados em que o instrutor do treinamento pode escolher tipo de demanda, na seção (a.1) entre Demanda Real e Demanda Homogênea com todos os clientes possuindo demanda de um pacote de 750 gramas. Também é possível selecionar e visualizar os veículos a serem usados na segunda camada, dentro da seção (a.2) e aplicar configurações e preparar matrizes de distâncias na seção (a.3).

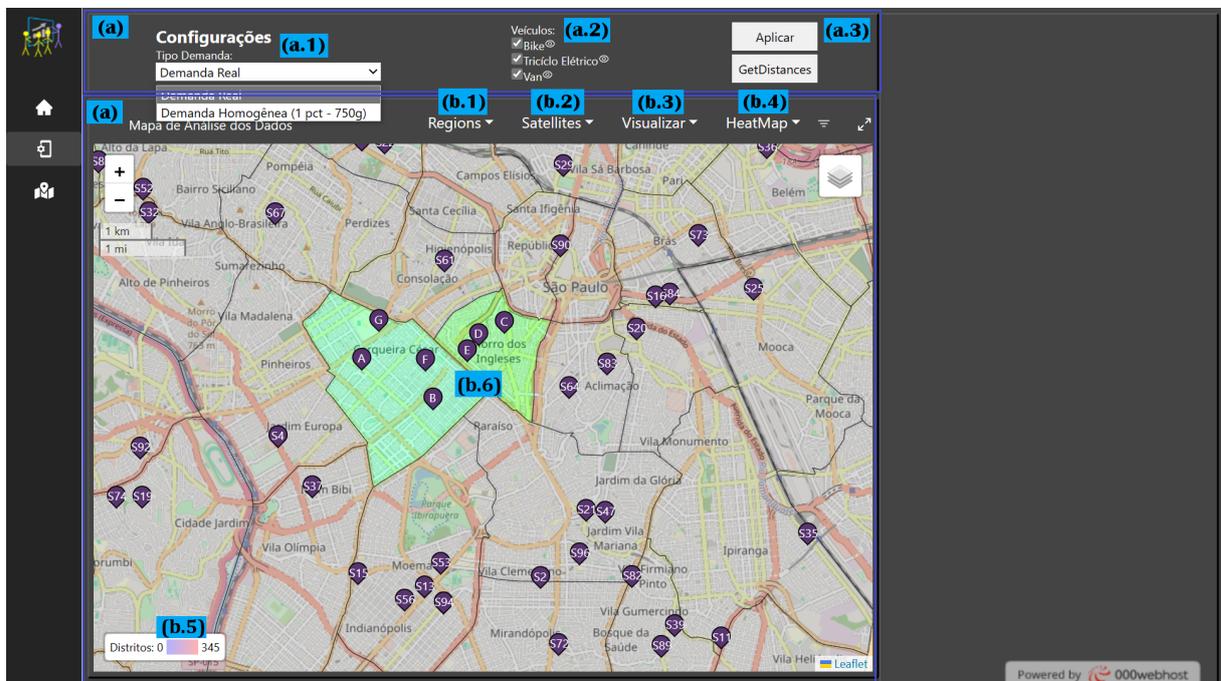
A seção (b) corresponde ao mapa contendo as seções (b.1), (b.2), (b.3) e (b.4) são *features*, como na Figura 31, que possibilitam, respectivamente, selecionar de regiões a

Figura 29: Tela Principal com créditos aos desenvolvedores



Fonte: Autor (2024)

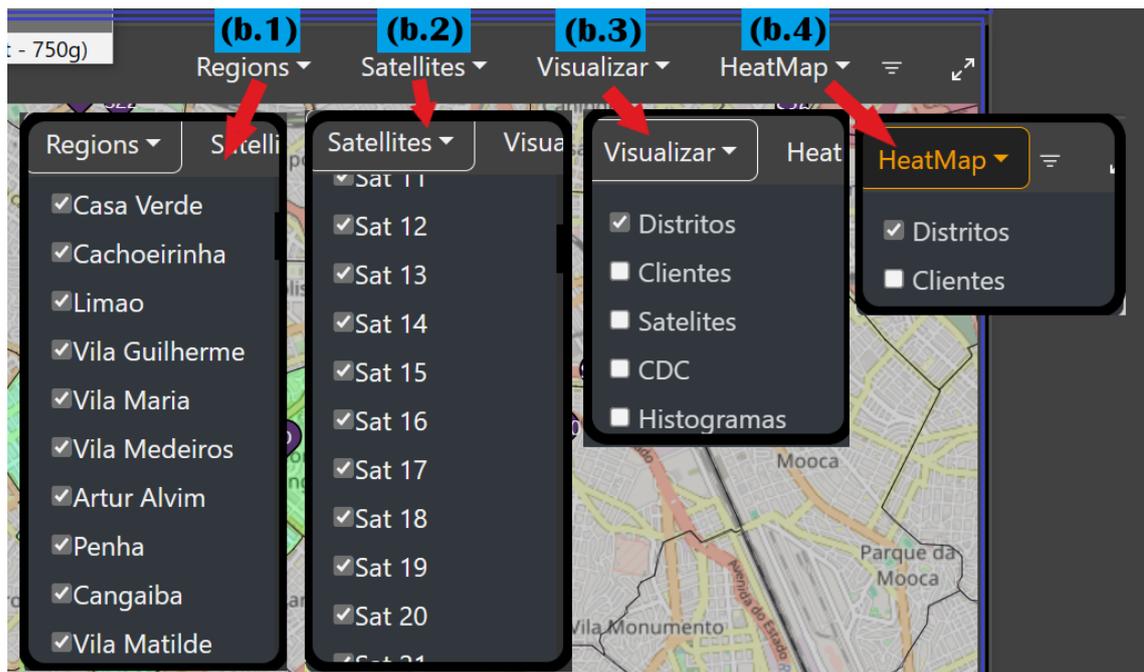
Figura 30: Tela de Preparação do DSS



Fonte: Autor (2024)

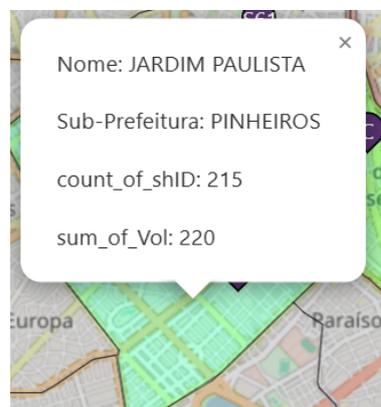
serem utilizados no treinamento, os satélites ativos nas regiões, opções de visualização e mapa de calor de clientes ou regiões. A seção (b.5) contém a legenda do mapa de calor das regiões em quantidade de pacotes. Por fim, a seção (b.6) contém o mapa e as visualizações selecionadas, sendo os pontos em roxo os satélites e, clicando sobre uma região, é possível visualizar seus dados, como na Figura 32.

Figura 31: Tela de Preparação do DSS - seção (b.1), (b.2), (b.3) e (b.4)



Fonte: Autor (2024)

Figura 32: Tela de Preparação do DSS - seção (b.6)



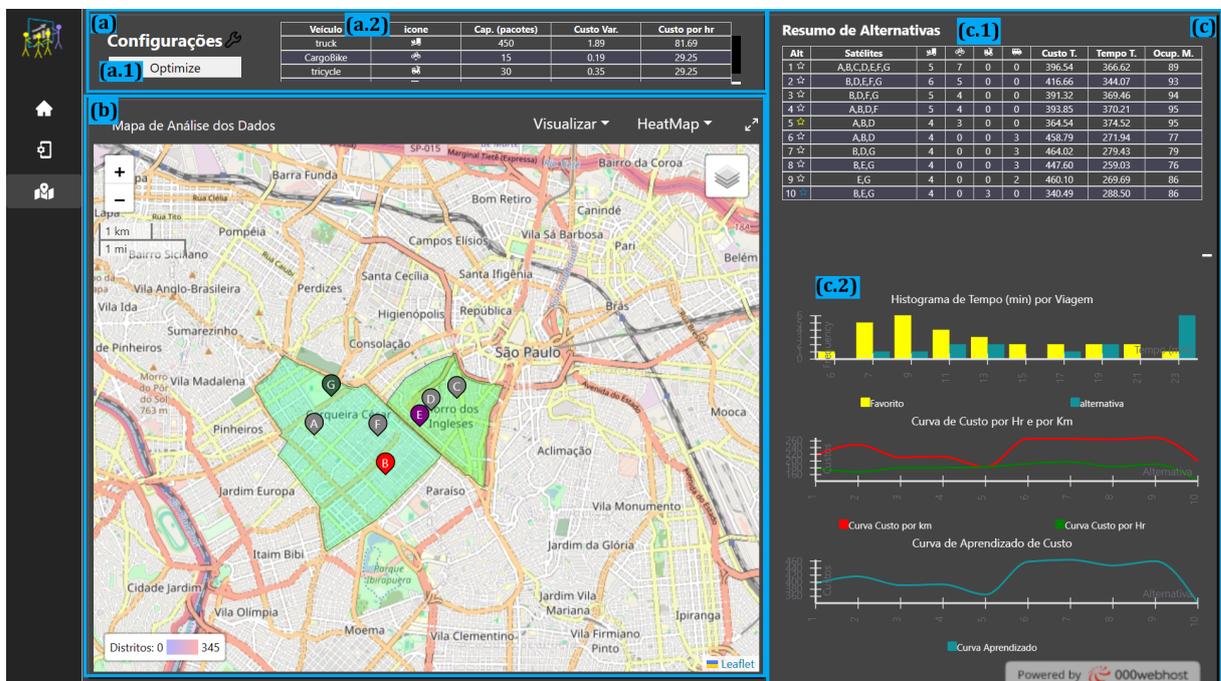
Fonte: Autor (2024)

5.1.3.3 Interface de Roteamento

Nesta interface, conforme apresentada na Figura 33, os alunos interagem com o sistema para buscar soluções para o problema proposto. A interface é dividida em três partes, sendo que a parte (b) compartilha funcionalidades semelhantes à seção (b) da Interface de Preparação. A diferença reside nos dados, uma vez que são apresentadas apenas informações referentes aos clientes e satélites das regiões selecionadas pelo instrutor. Além disso, há distinções nos comandos de mouse, que permitem ativar e desativar satélites, bem como alterar a frota de veículos associada a cada satélite. Vale notar que, agora, os satélites desativados são desconsiderados pela heurística durante o processo de roteirização.

Os comandos de mouse implementados na seção (b) são os seguintes: o duplo clique sobre satélites, que abre a janela de dados do satélite, possibilitando a alteração do tipo de veículo utilizado por ele; e o clique com o botão direito do mouse, que ativa a opção de ativar ou desativar o satélite. Vale notar que o satélite desativado é representado por uma cor cinza, enquanto o satélite ativado assume uma cor padrão

Figura 33: Tela de Roteamento do DSS

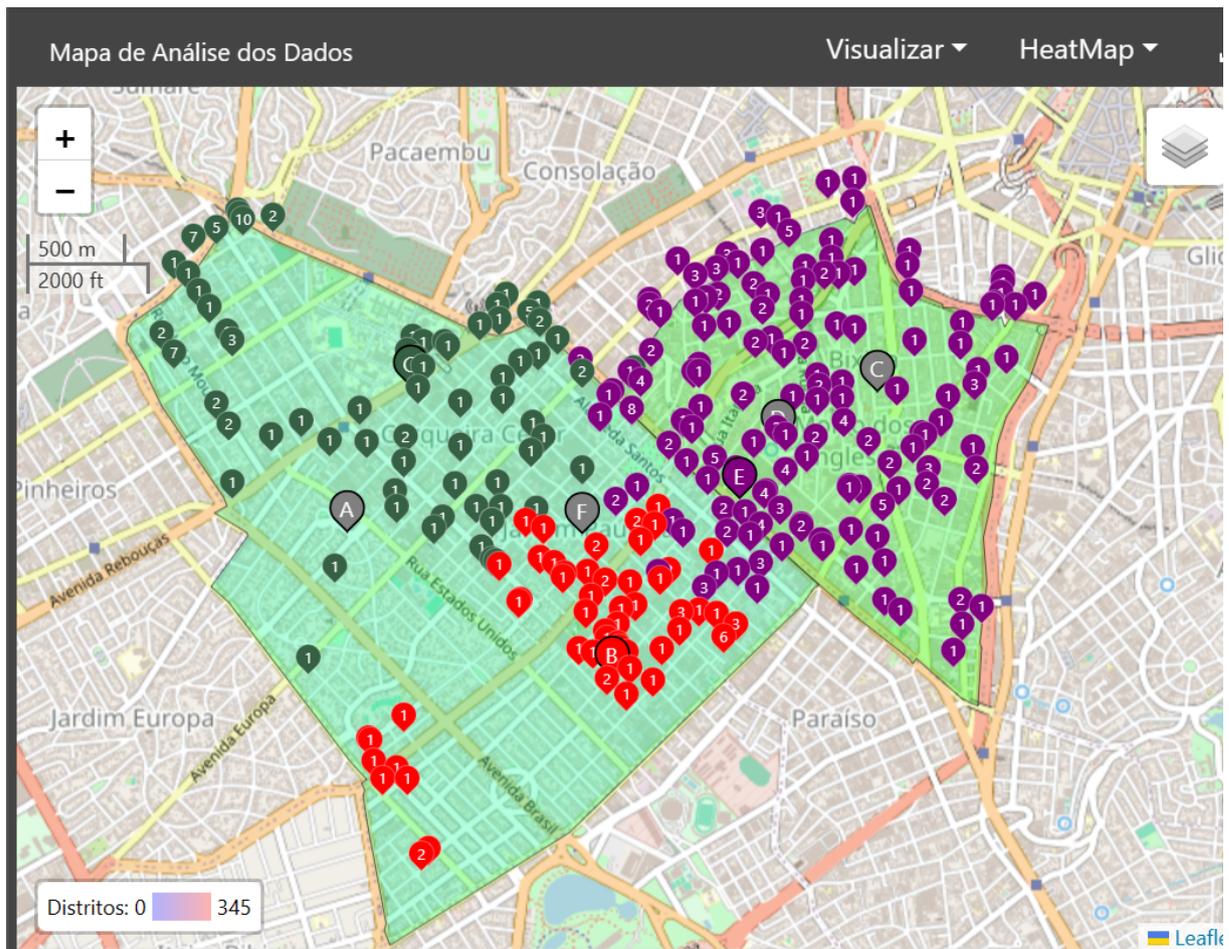


Fonte: Autor (2024)

A seção (a) pode ser compreendida em duas partes. Na subseção (a.1), o aluno tem acesso a um botão que otimiza a rede desenhada por ele, chamando a API de roteirização.

Além disso, após a conclusão da execução, caso a opção de visualização de clientes esteja habilitada, os clientes são coloridos de acordo com os satélites que os atendem, conforme exemplificado na Figura 34. Já na subseção (a.2), há uma tabela contendo os dados dos veículos utilizados no problema. Esses dados incluem os custos de utilização por hora trabalhada e por quilômetro deslocado, bem como a capacidade em pacotes de cada veículo.

Figura 34: Tela de Roteamento do DSS - seção b



Fonte: Autor (2024)

Por fim, a seção (c) é subdividida em duas partes, sendo que a subseção (c.1) compreende uma tabela contendo as alternativas criadas pelos alunos. Essa tabela apresenta informações sobre os satélites utilizados em cada alternativa, o tamanho da frota necessário para a rede, o desempenho de custo, o tempo total gasto nas entregas e a ocupação média dos veículos da segunda camada.

Já a subseção (c.2) abriga três gráficos distintos. O primeiro é um histograma do tempo de viagem dos veículos, representando a frequência da quantidade de viagens rea-

lizadas por esses veículos. Os segundo e terceiro gráficos são ferramentas de acompanhamento do desempenho do aluno. Estes apresentam os custos das alternativas geradas pelo aluno, permitindo a observação da evolução ao longo do tempo. Dessa forma, é possível analisar se as alternativas criadas estão melhorando ou piorando, proporcionando insights sobre o progresso do aprendizado do aluno.

5.2 Teste Piloto de Usabilidade

5.2.1 Resultados do Teste de Usabilidade

Após o desenvolvimento do sistema, foi realizado o teste piloto de usabilidade com potenciais usuários, sendo eles 15 alunos de graduação da disciplina de logística, 6 alunos de pós-graduação na área de gestão de operações logísticas e, também, 7 profissionais na área de logística, sendo 6 deles alunos de pós-graduação, totalizando 22 participantes que se candidatam para os testes. O teste teve como objetivo identificar eventuais necessidades de alteração de estilos ou layouts das telas de usuário, a facilidade de utilização e a análise de informações necessárias para a tomada de decisão, bem como avaliar a evolução da capacidade de tomada de decisão do usuário.

O público de alunos e profissionais logísticos selecionado para o teste de usabilidade derivou do objetivo de utilizar o sistema como base de treinamento para a decisão de localização de satélites de distribuição e de frota de veículos como parte de sua formação.

Os testes foram executados de forma individual para os profissionais em logística e em dupla para alunos de graduação e pós-graduação, a fim de somar *insights* e *feedbacks* dos alunos entre si e suprir diferenças de experiência entre aluno e profissional. No início do teste, o *script* do teste, disponível no Apêndice A, foi entregue para fornecer um contexto e objetivos para direcionar as decisões do público. Além disso, foi realizada uma demonstração das funcionalidades do sistema, bem como a entrega de algumas informações importantes, como a explicação do problema e o impacto das características de algumas regiões nas rotas criadas pelo sistema.

Os testes tiveram uma duração média de 50 minutos. Os participantes foram orientados a declarar em voz alta seus pensamentos e motivos para tomar sua decisão antes de avaliar os resultados dela, além de sinalizar caso ocorressem erros ou dúvidas sobre o sistema. Após o teste, os participantes foram instruídos a preencher um breve questionário sobre a usabilidade.

Tabela 5: Resultado do questionário do teste piloto de usabilidade para cada frase

| N | Frase | Valor Médio |
|----------|---|--------------------|
| 1 | O Sistema é fácil de usar | 4,33 |
| 2 | É fácil encontrar a informação que eu preciso | 3,89 |
| 3 | O Sistema tem uma interface agradável | 4,11 |
| 4 | Aprender a usar o Sistema é fácil | 3,56 |
| 5 | Eu fui capaz de tomar decisões com base nas informações e respostas apresentadas pelo sistema | 4,67 |
| 6 | O Sistema tem as características que eu esperava | 3,56 |
| 7 | Foi fácil fazer mudanças na rede (satélites e frota) | 3,83 |
| 8 | Pude identificar no Sistema o status da otimização do modelo | 4,50 |
| 9 | Os resultados do modelo apareceram rapidamente na página | 4,17 |
| 10 | Foi fácil identificar o impacto da mudança da rede no desempenho das entregas | 4,22 |
| 11 | Consegui identificar boas soluções e alternativas para rede | 4,67 |
| 12 | Eu fui capaz de comparar o desempenho da minha solução favorita com a atual | 4,39 |
| 13 | Identifiquei se a mudança da frota de veículos influencia desempenho da rede | 4,56 |
| 14 | Os gráficos do Sistema me auxiliam na avaliação de alternativas | 3,28 |
| 15 | O Sistema não tem bugs ou link/menu/página quebrados | 3,56 |

Fonte: Autor (2024)

O questionário foi desenvolvido para captar as percepções dos participantes sobre os recursos do sistema e a efetividade dele em auxiliar a tomada de decisão. Esse questionário foi planejado conforme Ahmad e Hussaini (2021), contendo 15 frases sobre recursos do sistema, apresentação de informações, facilidade de uso e velocidade de resolução.

No questionário, os participantes classificaram as frases utilizando a escala de Likert de cinco pontos, variando de “Discordo Fortemente” a “Concordo Fortemente”, além de um “Não se Aplica”, caso o item em questão não tenha sido avaliado. Realizando um teste de Cronbach Alpha nos questionários, calculou-se um índice alpha de 0,80, demonstrando boa consistência nas respostas dadas.

Após responder o questionário, os participantes foram convidados a fazer comentários e sugestões, possibilitando a identificação de pontos de melhoria e, inclusive, análises adicionais e ideias de painéis secundários para avaliação de desempenho individual de satélites.

O valor médio das frases 1, 2, 3 e 4, que variam entre 3,56 e 4,33, indicam que houve uma boa percepção sobre a facilidade de uso e compreensão do propósito do sistema. As notas próximas à escala de 3 (“Não discorda nem concorda”) na frase 4 foram decorrentes da dificuldade de alguns participantes em lembrar alguns comandos de mouse, como o clique do botão direito do mouse para abrir o menu de ativar ou desativar satélite e o duplo clique para abrir o menu de alteração de frota do satélite.

As frases de 5 a 14 visaram avaliar a usabilidade do sistema em si, e o valor médio das percepções dos participantes demonstram que o sistema é capaz de ajudá-los a tomar decisões e que os recursos permitem avaliar se as premissas que estão utilizando para guiá-los estão sendo efetivas ou não.

Especificamente, as frases 8 e 9 demonstram que o sistema consegue ser suficientemente rápido para a resolução do problema de roteirização e permite ter uma avaliação imediata das alternativas de soluções desejada.

As notas altas nas frases 5, 10, 11, 12, 13 e 14 demonstram que o sistema cumpre bem seu papel em guiar os participantes para a melhor solução do problema, sendo todos os alunos da pós-graduação e profissionais em logística capazes de identificar a melhor solução do problema proposto e 9 alunos da graduação alcançando as 3 melhores. A avaliação mais neutra na frase 14, com média de 3,28, deve-se em especial ao fato dos participantes terem se atentado majoritariamente à análise da tabela de resultados, utilizando os gráficos basicamente para avaliar sua evolução na qualidade das soluções das decisões tomadas.

A frase 6 demonstra que as características do sistema eram condizentes com suas expectativas, porém não suficientes, sendo a sugestão geral uma forma de avaliar o desempenho individual dos satélites e não somente o desempenho global da solução avaliada.

De forma semelhante à frase 4, a frase 7 teve a média abaixada para a escala 3 devido à dificuldade individual de alguns alunos em lembrar alguns comandos e demonstra a necessidade de facilitar mais esses comandos, dado que são essenciais para que façam mudanças na rede e tomem suas decisões.

Por fim, a frase 15 é pensada para avaliar se há erros ou bugs no sistema, porém identificou-se uma possível confusão no ato de responder essa frase, visto que durante o momento final do teste, no qual os participantes declararam suas sugestões, foi apontada inexistência de erros no sistema. Ainda assim, muitos marcaram a frase como “Nem concordo nem discordo”, o que reduziu a média da frase para 3,56.

5.2.2 Discussões do Teste de Usabilidade

De modo geral, ao término do teste, o sistema recebeu avaliações geralmente positivas, não havendo críticas negativas significativas por parte dos participantes. No entanto, uma sugestão relevante surgiu, apontando para a inclusão de funcionalidades e painéis adicionais. Entre as propostas, destaca-se a demanda por uma maneira mais ágil de reaplicar soluções anteriores diretamente a partir da tabela de resultados, bem como a adição de um painel dedicado à visualização do desempenho individual dos satélites. Estas melhorias visam otimizar o processo de tomada de decisão, proporcionando maior eficiência e praticidade aos usuários.

No que diz respeito aos *feedbacks* relacionados ao aprendizado e ao desenvolvimento das habilidades de tomada de decisão no contexto do problema abordado, as observações foram predominantemente positivas. Em geral, os participantes demonstraram habilidade ao atingir soluções ótimas do problema, com a maioria alcançando esse feito entre 23 e 64 alternativas geradas, sendo a moda concentrada entre 33 e 35. Essa distribuição sugere que, ao utilizar o sistema, os participantes conseguiram discernir eficientemente entre combinações menos promissoras, concentrando-se nas opções de maior potencial dentre as 381 possíveis soluções para o problema em questão. Esse resultado respalda a eficácia do sistema em aprimorar as habilidades de tomada de decisão dos usuários.

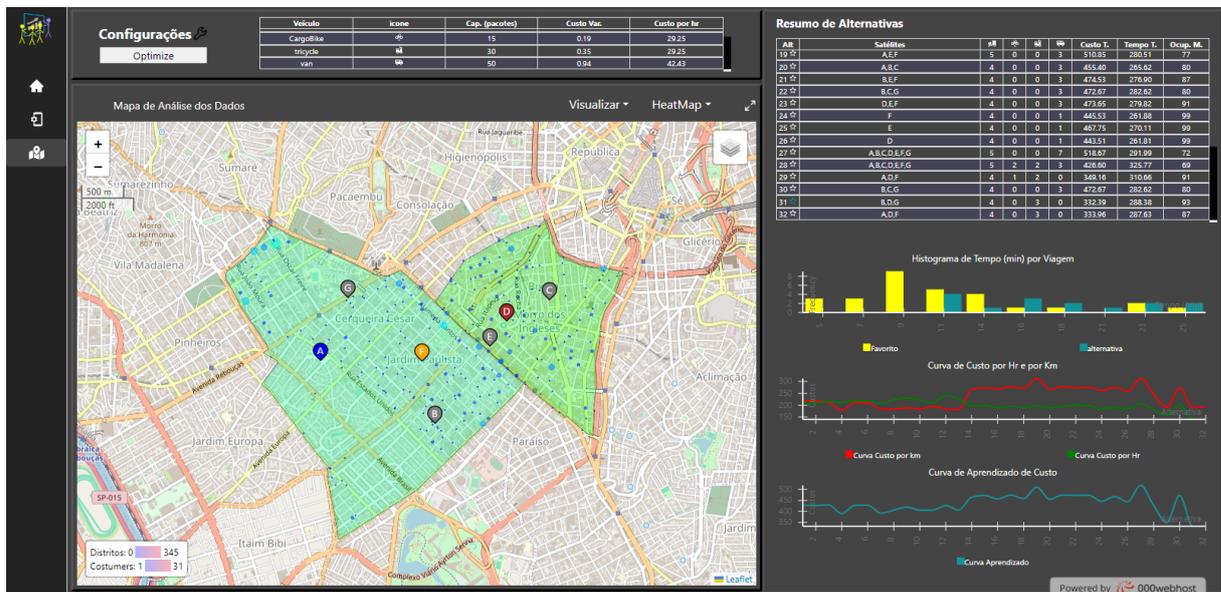
No exame detalhado do uso dos recursos do sistema pelos participantes, as gravações evidenciam uma variedade de abordagens, indicando uma diferenciação notável entre os alunos de graduação e os estudantes de pós-graduação, bem como os profissionais. Os alunos de graduação, ao fazerem suas escolhas, recorreram predominantemente às visualizações de calor e aos gráficos de desempenho das soluções, sugerindo uma inclinação para métodos mais intuitivos e visuais. Em contraste, os alunos de pós-graduação e os profissionais adotaram uma abordagem mais abrangente, explorando todos os recursos do sistema, com especial ênfase na Tabela de Resultados para monitorar indicadores de desempenho. Além disso, eles integraram informações visuais, utilizando gráficos para validar suas conclusões.

As decisões dos participantes foram estrategicamente fundamentadas, refletindo uma compreensão profunda das capacidades do sistema. Os alunos de graduação, ao focarem nos mapas de calor, direcionaram suas escolhas com base nos pontos de concentração de demanda, enquanto os participantes mais experientes empregaram uma análise mais abrangente. A seleção de satélites ativos e a avaliação da dispersão dos clientes foram critérios chave para a escolha de veículos, demonstrando uma abordagem mais holística

por parte dos alunos de pós-graduação e dos profissionais. Essa diferenciação na utilização dos recursos sugere não apenas preferências individuais, mas também níveis distintos de sofisticação na tomada de decisão, proporcionando uma visão valiosa sobre a adaptação do sistema às diversas necessidades e competências dos usuários.

A Figura 35 destaca a interface do sistema ao término do teste, correspondente a um participante que obteve uma das soluções mais eficazes para o problema em questão. A análise da curva de aprendizado e da tabela revela nuances interessantes do processo de tomada de decisão desse participante. Inicialmente, o exploratório enfoque nas primeiras alternativas sugere uma fase de investigação inicial, onde o participante analisou amplamente o problema. Posteriormente, há uma transição discernível para combinações mais específicas e de maior potencial, indicando uma mudança estratégica para opções mais refinadas à medida que o participante se aprofundava na otimização da solução. Essa evolução detalhada oferece uma visão perspicaz sobre a dinâmica da abordagem do participante e destaca momentos cruciais de sua jornada durante o teste.

Figura 35: Tela de Sistema Após término de um Participante



Fonte: Autor (2024)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou o problema da roteirização de veículos capacitados em duas camadas (2E-CVRP) aplicado à logística de *e-commerce*. Ao longo da pesquisa, identificou-se que o crescimento exponencial do volume de entregas no *e-commerce* tem transformado a dinâmica da rede de distribuição logística, apresentando novos desafios, principalmente em áreas urbanas.

Nesse contexto, o problema de 2E-CVRP surge como uma solução para enfrentar os desafios logísticos, dividindo a rede de distribuição em dois níveis e utilizando diferentes tipos de veículos. Essa abordagem permite a consolidação e transferência de mercadorias entre os veículos de forma eficiente, contribuindo para a melhoria da logística urbana.

Ao estabelecer os objetivos deste trabalho, buscou-se desenvolver um sistema interativo de apoio à decisão que auxiliasse os tomadores de decisão na avaliação dos melhores locais para estabelecer satélites de distribuição e suas respectivas frotas, com o intuito de otimizar as entregas no 2E-CVRP. Para alcançar esses objetivos, foram estabelecidos requisitos específicos para o sistema, incluindo a capacidade de avaliar o perfil de entregas, permitir a rápida avaliação de alternativas de decisão e auxiliar na análise de desempenho e preferência.

Para tanto, uma heurística foi desenvolvida baseado em busca local sendo sua avaliação realizada por meio de *benchmarks* de instâncias usadas por Jie et al. (2019) para conferir o desempenho em termos de tempo computacional e distâncias das melhores soluções possíveis.

Os resultados do trabalho mostram que a heurística é capaz de alcançar *gap* médio de 7,4% tanto em relação a Jie et al. (2019) quanto as incumbentes da solução do modelo matemático do problema e tempo computacional médio de 9,26 segundos, alcançando as metas do trabalho que eram *gaps* de 10% e tempo 30 segundos.

Os resultados do estudo revelam que a heurística é capaz de atingir um *gap* médio de 7,4%, tanto em comparação com o estudo de Jie et al. (2019) quanto com as soluções incumbentes do modelo matemático do problema. Além disso, o tempo computacional médio é de 9,26 segundos, cumprindo assim as metas estabelecidas pelo trabalho, que eram *gaps* de até 10% e um tempo máximo de 30 segundos.

Apesar disso, ao observar o intervalo de variação desses resultados, fica clara a necessidade de melhorias na heurística visando *gaps* mais consistentes e melhores.

O desenvolvimento do sistema foi concluído com êxito e os testes pilotos de usabilidade foram realizados com 22 participantes, incluindo estudantes na área de logística em níveis de graduação e pós-graduação, além de profissionais com experiência variando entre 1 e 7 anos na área.

A partir dos testes pilotos de usabilidade, identificou-se que os participantes consideraram o sistema fácil de usar, embora alguns tenham enfrentado dificuldades iniciais em memorizar alguns comandos de mouse. Além disso, houve consenso entre os participantes de que o sistema atende às suas expectativas e, de fato, auxilia na tomada de decisão. Em conjunto com o *script* do teste, o sistema os conduziu para as melhores soluções de maneira suficientemente rápida. Por fim, o sistema não apresentou *bugs* ou erros de página durante os testes, satisfazendo os participantes.

Para recomendações de trabalhos futuros, a heurística pode ser aprimorada, incluindo procedimentos de busca em vizinhança, como técnicas de Busca Tabu, para melhorar a eficiência das buscas e permitir a inclusão de mais operadores visando ganhos no *gap*. Além disso, sugere-se a inclusão do fator multiobjetivo na função objetivo.

Quanto às melhorias no sistema, os participantes indicaram a inclusão de um painel de monitoramento do desempenho individual dos satélites, sendo isso considerado uma etapa futura. Também, para aprimorar o ambiente de treinamento, sugere-se a implementação de um ambiente de competição entre participantes, com um ranking das melhores soluções encontradas.

Em termos de módulos e expansão do problema, sugere-se, para trabalhos futuros, a avaliação multi-período, possibilitando visualizar o impacto da solução avaliada em diversos dias. Além disso, a inclusão de indicadores de sustentabilidade, como emissão de carbono, e pontos de recarga de bateria, para uma melhor avaliação de veículos elétricos, possibilitando avançar o estudo para treinamentos relacionados à transição energética e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

- AGÁRDI, A.; KOVÁCS, L.; BÁNYAI, T. Two - echelon vehicle routing problem with recharge stations. *Transport and Telecommunication Journal*, Walter de Gruyter GmbH, v. 20, n. 4, p. 305–317, nov. 2019. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0025⟩](https://doi.org/10.2478/ttj-2019-0025).
- AGGARWAL, S.; KUMAR, S.; TIWARI, M. K. Decision support system for pradhan mantri ujjwala yojana. *Energy Policy*, Elsevier BV, v. 118, p. 455–461, jul. 2018. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.011⟩](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.04.011).
- AHMAD, N. A.; HUSSAINI, M. A usability testing of a higher education mobile application among postgraduate and undergraduate students. *International Journal of Interactive Mobile Technologies (iJIM)*, v. 15, n. 9, 2021. Disponível em: [⟨https://onlineojs.org/index.php/i-jim/article/view/19943⟩](https://onlineojs.org/index.php/i-jim/article/view/19943).
- AHMED, S.; EL-SAYEGH, S. Critical review of the evolution of project delivery methods in the construction industry. *Buildings*, MDPI AG, v. 11, n. 1, p. 11, dez. 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.3390/buildings11010011⟩](https://doi.org/10.3390/buildings11010011).
- AL-NAWAYSEH, M. K. et al. An adaptive decision support system for last mile logistics in e-commerce. *International Journal of Decision Support System Technology*, IGI Global, v. 5, n. 1, p. 40–65, jan. 2013. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.4018/jdsst.2013010103⟩](https://doi.org/10.4018/jdsst.2013010103).
- ALIEINYKOV, I. et al. Development of a method of fuzzy evaluation of information and analytical support of strategic management. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Private Company Technology Center, v. 6, n. 2 (102), p. 16–27, nov. 2019. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394⟩](https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.184394).
- ALOTAIBI, Y. Automated business process modelling for analyzing sustainable system requirements engineering. In: *2020 6th International Conference on Information Management (ICIM)*. IEEE, 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1109/icim49319.2020.244690⟩](https://doi.org/10.1109/icim49319.2020.244690).
- AMAROUCHE, Y.; GUIBADJ, R. N.; MOUKRIM, A. A neighborhood search and set cover hybrid heuristic for the two-echelon vehicle routing problem. In: BORNDÖRFER, R.; STORANDT, S. (Ed.). *18th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems (ATMOS 2018)*. Dagstuhl, Germany: Schloss Dagstuhl–Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2018. (OpenAccess Series in Informatics (OASICS), v. 65), p. 11:1–11:15. ISBN 978-3-95977-096-5. ISSN 2190-6807. Disponível em: [⟨http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2018/9716⟩](http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2018/9716).
- ANDERLUH, A.; HEMMELMAYR, V. C.; NOLZ, P. C. Synchronizing vans and cargo bikes in a city distribution network. *Central European Journal of Operations Research*, Springer Science and Business Media LLC, v. 25, n. 2, p. 345–376, mar. 2016. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z⟩](https://doi.org/10.1007/s10100-016-0441-z).

ANDERLUH, A. et al. Impact of travel time uncertainties on the solution cost of a two-echelon vehicle routing problem with synchronization. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, Springer Science and Business Media LLC, v. 32, n. 4, p. 806–828, abr. 2019. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1007/s10696-019-09351-w〉](https://doi.org/10.1007/s10696-019-09351-w).

ANDERLUH, A. et al. Multi-objective optimization of a two-echelon vehicle routing problem with vehicle synchronization and ‘grey zone’ customers arising in urban logistics. *European Journal of Operational Research*, v. 289, n. 3, p. 940–958, 2021. ISSN 0377-2217. Disponível em: [〈https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221719306289〉](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221719306289).

ARCHETTI, C.; BIANCHETTI, N.; SPERANZA, M. G. Branch-and-cut algorithms for the split delivery vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 238, n. 3, p. 685–698, nov. 2014. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.026〉](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.04.026).

ARENALES, M. et al. *Pesquisa operacional*. Elsevier: ABEPRO, 2011.

ASSIS, T. F. de et al. Methodology for prioritizing best practices applied to the sustainable last mile—the case of a brazilian parcel delivery service company. *Sustainability*, MDPI AG, v. 14, n. 7, p. 3812, mar. 2022. Disponível em: [〈https://doi.org/10.3390/su14073812〉](https://doi.org/10.3390/su14073812).

BALDACCI, R.; CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A. An exact algorithm for the vehicle routing problem based on the set partitioning formulation with additional cuts. *Mathematical Programming*, Springer Science and Business Media LLC, v. 115, n. 2, p. 351–385, ago. 2007. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1007/s10107-007-0178-5〉](https://doi.org/10.1007/s10107-007-0178-5).

BALDACCI, R.; MINGOZZI, A. A unified exact method for solving different classes of vehicle routing problems. *Mathematical Programming*, Springer Science and Business Media LLC, v. 120, n. 2, p. 347–380, abr. 2008. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1007/s10107-008-0218-9〉](https://doi.org/10.1007/s10107-008-0218-9).

BALDACCI, R.; MINGOZZI, A.; ROBERTI, R. New route relaxation and pricing strategies for the vehicle routing problem. *Operations Research*, INFORMS, v. 59, n. 5, p. 1269–1283, 2011. ISSN 0030364X, 15265463. Disponível em: [〈http://www.jstor.org/stable/41316029〉](http://www.jstor.org/stable/41316029).

BALDACCI, R. et al. An exact algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Operations Research*, INFORMS, v. 61, n. 2, p. 298–314, 2013. ISSN 0030364X, 15265463. Disponível em: [〈http://www.jstor.org/stable/23481831〉](http://www.jstor.org/stable/23481831).

BARFOD, M. B.; SALLING, K. B. A new composite decision support framework for strategic and sustainable transport appraisals. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier BV, v. 72, p. 1–15, fev. 2015. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.001〉](https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.001).

BASHA, S. M.; RAJPUT, D. S. Survey on evaluating the performance of machine learning algorithms: Past contributions and future roadmap. In: *Deep Learning and Parallel Computing Environment for Bioengineering Systems*. Elsevier, 2019. p. 153–164. Disponível em: [〈https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816718-2.00016-6〉](https://doi.org/10.1016/b978-0-12-816718-2.00016-6).

BELENGUER, J. M.; MARTINEZ, M. C.; MOTA, E. A lower bound for the split delivery vehicle routing problem. *Operations Research*, INFORMS, v. 48, n. 5, p. 801–810, 2000. ISSN 0030364X, 15265463. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/223032>.

BELGIN, O.; KARAOGLAN, I.; ALTIPARMAK, F. Two-echelon vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery: Mathematical model and heuristic approach. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier BV, v. 115, p. 1–16, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.032>.

BEVILAQUA, A.; BEVILAQUA, D.; YAMANAKA, K. Parallel island based memetic algorithm with lin–kernighan local search for a real-life two-echelon heterogeneous vehicle routing problem based on brazilian wholesale companies. *Applied Soft Computing*, Elsevier BV, v. 76, p. 697–711, mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.12.036>.

BRAUN, H. On solving travelling salesman problems by genetic algorithms. In: *Parallel Problem Solving from Nature*. Springer-Verlag, 1990. p. 129–133. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/bfb0029743>.

BREUNIG, U. et al. The electric two-echelon vehicle routing problem. *Computers Operations Research*, v. 103, p. 198–210, 2019. ISSN 0305-0548. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054818302909>.

BREUNIG, U. et al. A large neighbourhood based heuristic for two-echelon routing problems. *Computers Operations Research*, v. 76, p. 208–225, 2016. ISSN 0305-0548. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054816301459>.

CAGGIANI, L. et al. An eco-friendly decision support system for last-mile delivery using e-cargo bikes. In: *2020 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2020 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*. IEEE, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/eeeic/icpseurope49358.2020.9160817>.

CARRASCO-RIBELLES, L. A. et al. Dynamics of multimorbidity and frailty, and their contribution to mortality, nursing home and home care need: A primary care cohort of 1 456 052 ageing people. *eClinicalMedicine*, v. 52, p. 101610, 2022. ISSN 2589-5370. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589537022003406>.

CHEN, F. et al. Product2vec: Understanding product-level competition using representation learning. *SSRN Electronic Journal*, Elsevier BV, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3519358>.

CIPTAYANI, P. I.; DEWI, K. C. Decision support system of e-book provider selection for library using simple additive weighting. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, v. 953, p. 012066, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/953/1/012066>.

CONTARDO, C.; CORDEAU, J.-F.; GENDRON, B. A computational comparison of flow formulations for the capacitated location-routing problem. *Discrete*

Optimization, v. 10, n. 4, p. 263–295, 2013. ISSN 1572-5286. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572528613000339⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1572528613000339).

CONTARDO, C.; HEMMELMAYR, V.; CRAINIC, T. G. Lower and upper bounds for the two-echelon capacitated location-routing problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier BV, v. 39, n. 12, p. 3185–3199, dez. 2012. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.003⟩](https://doi.org/10.1016/j.cor.2012.04.003).

COSTA, L.; CONTARDO, C.; DESAULNIERS, G. Exact branch-price-and-cut algorithms for vehicle routing. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 53, n. 4, p. 946–985, jul. 2019. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0878⟩](https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0878).

CRAINIC, T. G.; GENDREAU, M.; GENDRON, B. *Network design with applications to transportation and logistics*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2021.

CRAINIC, T. G. et al. *Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem*. Montréal, Québec, Canada: Technical Report. CIRRELT-2008-46, CIRRELT., 2008.

CRAINIC, T. G. et al. Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem. In: *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Springer Berlin Heidelberg, 2011. p. 179–190. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/978-3-642-20364-0_16⟩](https://doi.org/10.1007/978-3-642-20364-0_16).

CRAINIC, T. G. et al. GRASP with path relinking for the two-echelon vehicle routing problem. In: *Operations Research/Computer Science Interfaces Series*. Springer New York, 2013. p. 113–125. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1_7⟩](https://doi.org/10.1007/978-1-4614-6322-1_7).

CRESWELL, J. W. *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches*. New Delhi, India: SAGE, 2014.

DELLAERT, N. et al. Branch-and-price-based algorithms for the two-echelon vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 53, n. 2, p. 463–479, mar. 2019. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0844⟩](https://doi.org/10.1287/trsc.2018.0844).

DUKES, L.; YUAN, X.; AKOWUAH, F. A case study on web application security testing with tools and manual testing. In: *2013 Proceedings of IEEE Southeastcon*. IEEE, 2013. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1109/secon.2013.6567420⟩](https://doi.org/10.1109/secon.2013.6567420).

ENTHOVEN, D. L. et al. The two-echelon vehicle routing problem with covering options: City logistics with cargo bikes and parcel lockers. *Computers & Operations Research*, Elsevier BV, v. 118, p. 104919, jun. 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104919⟩](https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104919).

FABBRI, T.; VICEN-BUENO, R. Weather-routing system based on METOC navigation risk assessment. *Journal of Marine Science and Engineering*, MDPI AG, v. 7, n. 5, p. 127, maio 2019. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.3390/jmse7050127⟩](https://doi.org/10.3390/jmse7050127).

FENG, T.; ZHANG, J. Multicriteria evaluation on accessibility-based transportation equity in road network design problem. *Journal of Advanced Transportation*, Wiley, v. 48, n. 6, p. 526–541, ago. 2012. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1002/atr.1202⟩](https://doi.org/10.1002/atr.1202).

- FERREIRA, G. X. et al. Visual analytics to support industrial vehicle fleet planning. In: *2021 25th International Conference Information Visualisation (IV)*. IEEE, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/iv53921.2021.00020>.
- FIKAR, C.; HIRSCH, P.; GRONALT, M. A decision support system to investigate dynamic last-mile distribution facilitating cargo-bikes. *International Journal of Logistics Research and Applications*, v. 21, p. 300 – 317, 2018.
- FOUIAL, A.; DÍAZ, J. A. R. DESIDS: An integrated decision support system for the planning, analysis, management and rehabilitation of pressurised irrigation distribution systems. *Modelling*, MDPI AG, v. 2, n. 2, p. 308–326, maio 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/modelling2020016>.
- GE, X.; JIN, Y. Artificial intelligence algorithms for proactive dynamic vehicle routing problem. In: *Applications of Artificial Intelligence in Process Systems Engineering*. Elsevier, 2021. p. 497–522. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-821092-5.00011-5>.
- GONZALEZ-CALDERON, C. A. et al. Cargo bicycles as an alternative to make sustainable last-mile deliveries in medellin, colombia. *Case Studies on Transport Policy*, Elsevier BV, v. 10, n. 2, p. 1172–1187, jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.04.006>.
- GONZALEZ-FELIU, J. et al. *The two-echelon capacitated vehicle routing problem*. [S.l.], 2008. Disponível em: <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00879447>.
- GORA, P. et al. On a road to optimal fleet routing algorithms: a gentle introduction to the state-of-the-art. In: *Smart Delivery Systems*. Elsevier, 2020. p. 37–92. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-815715-2.00014-2>.
- GU, W. et al. A sequential approach for a multi-commodity two-echelon distribution problem. *Computers Industrial Engineering*, v. 163, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812000871>.
- GUASTAROBA, G.; SPERANZA, M. G.; VIGO, D. Intermediate facilities in freight transportation planning: A survey. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 50, n. 3, p. 763–789, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0631>.
- GUO, X. et al. WITHDRAWN: Fuzzy bayesian network based on an improved similarity aggregation method for risk assessment of storage tank accident. *Process Safety and Environmental Protection*, Elsevier BV, v. 144, p. 242–252, dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.07.030>.
- HE, P.; LI, J. The two-echelon multi-trip vehicle routing problem with dynamic satellites for crop harvesting and transportation. *Applied Soft Computing*, v. 77, p. 387–398, 2019. ISSN 1568-4946. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494619300468>.
- HEMMELMAYR, V. C.; CORDEAU, J.-F.; CRAINIC, T. G. An adaptive large neighborhood search heuristic for two-echelon vehicle routing problems arising in city logistics. *Computers Operations Research*, v. 39, n. 12, p. 3215–3228, 2012.

ISSN 0305-0548. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054812000871>).

IWAN, S. et al. Efficiency of light electric vehicles in last mile deliveries – szczecin case study. *Sustainable Cities and Society*, Elsevier BV, v. 74, p. 103167, nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103167>).

JANJEVIC, M.; WINKENBACH, M.; MERCHÁN, D. Integrating collection-and-delivery points in the strategic design of urban last-mile e-commerce distribution networks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier BV, v. 131, p. 37–67, nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.09.001>).

JEPSEN, M.; SPOORENDONK, S.; ROPKE, S. A branch-and-cut algorithm for the symmetric two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science, INFORMS*, v. 47, n. 1, p. 23–37, 2013. ISSN 00411655, 15265447. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/23362884>).

JIE, W. et al. The two-echelon capacitated electric vehicle routing problem with battery swapping stations: Formulation and efficient methodology. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 272, n. 3, p. 879–904, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.07.002>).

KAZAK, J. Decision support systems for a sustainable management of the indoor and built environment. *Indoor and Built Environment*, 2018.

KÖNNÖLÄ, K. et al. Agile methods in embedded system development: Multiple-case study of three industrial cases. *Journal of Systems and Software*, Elsevier BV, v. 118, p. 134–150, ago. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jss.2016.05.001>).

LANKSHEAR, G.; ETTORRE, E.; MASON, D. Decision-making, uncertainty and risk: Exploring the complexity of work processes in NHS delivery suites. *Health, Risk & Society*, Informa UK Limited, v. 7, n. 4, p. 361–377, dez. 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/13698570500390499>).

LEE, H. et al. Cost-effectiveness analysis of the implementation of a national immunization program for rotavirus vaccination in a country with a low rotavirus gastroenteritis-related mortality: A south korean study. *Vaccine*, v. 37, n. 35, p. 4987–4995, 2019. ISSN 0264-410X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264410X19309211>).

LETCHFORD, A. N.; EGGLESE, R. W.; LYSGAARD, J. Multistars, partial multistars and the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, Springer Science and Business Media LLC, v. 94, n. 1, p. 21–40, dez. 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10107-002-0336-8>).

LI, H. et al. The two-echelon city logistics system with on-street satellites. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier BV, v. 139, p. 105577, jan. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.12.024>).

LI, H. et al. The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems considering carbon dioxide emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier BV, v. 49, p. 231–245, dec 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.002>).

- LI, H. et al. The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier BV, v. 94, p. 169–188, dec 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trb.2016.09.012>.
- LIU, R. et al. Simulation-based optimisation approach for the stochastic two-echelon logistics problem. *International Journal of Production Research*, Informa UK Limited, v. 55, n. 1, p. 187–201, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1201221>.
- LURKIN, V.; HAMBUECKERS, J.; WOENSEL, T. van. Urban low emissions zones: A behavioral operations management perspective. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier BV, v. 144, p. 222–240, fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.11.015>.
- LYSGAARD, J.; LETCHFORD, A. N.; EGGLESE, R. W. A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, Springer Science and Business Media LLC, v. 100, n. 2, p. 423–445, jun. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0481-8>.
- MARQUES, G. et al. An improved branch-cut-and-price algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier BV, v. 114, p. 104833, fev. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2019.104833>.
- MAZZUTO, G. et al. Fuzzy cognitive maps designing through large dataset and experts' knowledge balancing. In: *2018 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/fuzz-ieee.2018.8491657>.
- MENSHENIN, Y.; CRAWLEY, E. A system concept representation framework and its testing on patents, urban architectural patterns, and software patterns. *Systems Engineering*, Wiley, v. 23, n. 4, p. 492–515, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/sys.21547>.
- MHAMEDI, T. et al. A branch-price-and-cut algorithm for the two-echelon vehicle routing problem with time windows. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 56, n. 1, p. 245–264, jan. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.2021.1092>.
- MÜHLBAUER, F.; FONTAINE, P. A parallelised large neighbourhood search heuristic for the asymmetric two-echelon vehicle routing problem with swap containers for cargo-bicycles. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 289, n. 2, p. 742–757, mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.07.034>.
- NEGHABADI, P. D.; SAMUEL, K. E.; ESPINOUSE, M.-L. Systematic literature review on city logistics: overview, classification and analysis. *International Journal of Production Research*, Informa UK Limited, v. 57, n. 3, p. 865–887, jul. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1489153>.
- NGUYEN, V.-P.; PRINS, C.; PRODHON, C. Solving the two-echelon location routing problem by a GRASP reinforced by a learning process and path relinking. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 216, n. 1, p. 113–126, jan. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2011.07.030>.

- PAUL, A. et al. A bi-objective two-echelon pollution routing problem with simultaneous pickup and delivery under multiple time windows constraint. *OPSEARCH*, Springer Science and Business Media LLC, v. 58, n. 4, p. 962–993, fev. 2021. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/s12597-020-00481-6⟩](https://doi.org/10.1007/s12597-020-00481-6).
- PECIN, D. et al. Improved branch-cut-and-price for capacitated vehicle routing. *Mathematical Programming Computation*, Springer Science and Business Media LLC, v. 9, n. 1, p. 61–100, jun. 2016. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/s12532-016-0108-8⟩](https://doi.org/10.1007/s12532-016-0108-8).
- PERBOLI, G.; ROSANO, M. A decision support system for optimizing the last-mile by mixing traditional and green logistics. In: *Lecture Notes in Business Information Processing*. Springer International Publishing, 2018. p. 28–46. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/978-3-319-73758-4_3⟩](https://doi.org/10.1007/978-3-319-73758-4_3).
- PERBOLI, G.; TADEI, R.; MASOERO, F. Valid inequalities for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *CIRRELT, Montr´eal, CIRRELT-2009-39*, 2009.
- PERBOLI, G.; TADEI, R.; MASOERO, F. New families of valid inequalities for the two-echelon vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, v. 36, p. 639–646, 2010. ISSN 1571-0653. ISCO 2010 - International Symposium on Combinatorial Optimization. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157106531000082X⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S157106531000082X).
- PERBOLI, G.; TADEI, R.; VIGO, D. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics. *CIRRELT, Montr´eal, CIRRELT-2008-55*, 2008.
- PERBOLI, G.; TADEI, R.; VIGO, D. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: Models and math-based heuristics. *Transportation Science*, INFORMS, v. 45, n. 3, p. 364–380, 2011. ISSN 00411655, 15265447. Disponível em: [⟨http://www.jstor.org/stable/23018533⟩](http://www.jstor.org/stable/23018533).
- PESSOA, A. et al. A generic exact solver for vehicle routing and related problems. *Mathematical Programming*, Springer Science and Business Media LLC, v. 183, n. 1-2, p. 483–523, jun. 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1007/s10107-020-01523-z⟩](https://doi.org/10.1007/s10107-020-01523-z).
- PIATKOWSKI, D.; MARSHALL, W. We count what we care about: Advancing a framework for valuing investments in active modes. *Research in Transportation Business Management*, v. 29, p. 63–70, 2018. ISSN 2210-5395. Special Issue title: [RE]EVALUATING HOW WE VALUE TRANSPORTATION. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539517301669⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210539517301669).
- PICOLI, M. C. A. et al. Big earth observation time series analysis for monitoring brazilian agriculture. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 145, p. 328–339, 2018. ISSN 0924-2716. SI: Latin America Issue. Disponível em: [⟨https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271618302260⟩](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271618302260).
- POWER, D. *Decision support systems*. Westport, CT: Praeger, 2002.
- PSAROMMATIS, F.; KIRITSIS, D. A hybrid decision support system for automating decision making in the event of defects in the era of zero defect manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*, Elsevier BV, v. 26, p. 100263, mar. 2022. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100263⟩](https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100263).

- RAHMAN, M. R.; AKHTER, S. Bi-directional traffic management support system with decision tree based dynamic routing. In: *2015 10th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST)*. IEEE, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/icitst.2015.7412080>.
- REXFELT, O.; ROSENBLAD, E. The progress of user requirements through a software development project. *International Journal of Industrial Ergonomics*, Elsevier BV, v. 36, n. 1, p. 73–81, jan. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2005.08.002>.
- RICHMOND, M. et al. Multi-criteria decision analysis for benchmarking human-free lifting solutions in the offshore wind energy environment. *Energies*, MDPI AG, v. 11, n. 5, p. 1175, maio 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en11051175>.
- SADYKOV, R.; UCHOA, E.; PESSOA, A. A bucket graph-based labeling algorithm with application to vehicle routing. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 55, n. 1, p. 4–28, jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.2020.0985>.
- SAHRAEIAN, R.; ESMAEILI, M. A multi-objective two-echelon capacitated vehicle routing problem for perishable products. *Journal of Industrial and Systems Engineering*, v. 11, n. 2, p. 62–84, 2018.
- SANTOS, F. A.; CUNHA, A. S. da; MATEUS, G. R. Branch-and-price algorithms for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Optimization Letters*, Springer Science and Business Media LLC, v. 7, n. 7, p. 1537–1547, out. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11590-012-0568-3>.
- SANTOS, F. A.; MATEUS, G. R.; CUNHA, A. S. da. A branch-and-cut-and-price algorithm for the two-echelon capacitated vehicle routing problem. *Transportation Science*, INFORMS, v. 49, n. 2, p. 355–368, 2015. ISSN 00411655, 15265447. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/43666743>.
- SANTOS, F. A. A. de A. *Otimização visual interativa com múltiplos critérios: sistema de apoio à decisão para treinamento em logística humanitária*. Tese (Doutorado), 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/d.3.2021.tde-12042021-145621>.
- SAVELSBERGH, M.; WOENSEL, T. V. 50th anniversary invited article—city logistics: Challenges and opportunities. *Transportation Science*, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS), v. 50, n. 2, p. 579–590, maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0675>.
- ŞENSOY, A.; UYSAL, G.; ŞORMAN, A. Developing a decision support framework for real-time flood management using integrated models. *Journal of Flood Risk Management*, Wiley, v. 11, p. S866–S883, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12280>.
- SHAO, W.; SHAO, Z.; PI, D. A network memetic algorithm for energy and labor-aware distributed heterogeneous hybrid flow shop scheduling problem. *Swarm and Evolutionary Computation*, v. 75, p. 101190, 2022. ISSN 2210-6502. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210650222001572>.

SHARDA, R.; DELEN, D.; TURBAN, E. *Business Intelligence and Analytics*. 10. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2013.

SIEGFRIED, P.; ZHANG, J. J. Developing a sustainable concept for urban last-mile delivery. *Open Journal of Business and Management*, Scientific Research Publishing, Inc., v. 09, n. 01, p. 268–287, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4236/ojbm.2021.91015>.

SNOECK, A.; WINKENBACH, M. The value of physical distribution flexibility in serving dense and uncertain urban markets. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier BV, v. 136, p. 151–177, jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tra.2020.02.011>.

STARKWEATHER, T. et al. A comparison of genetic sequencing operators. In: *International Conference on Genetic Algorithms*. [S.l.: s.n.], 1991.

TALBI, E.-G. *Metaheuristics*. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2009. (Wiley Series on Parallel and Distributed Computing).

TANIGUCHI, E. Concepts of city logistics for sustainable and liveable cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 151, p. 310–317, 2014. ISSN 1877-0428. Green Cities - Green Logistics for Greener Cities, Szczecin, 19-21 May 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042814054718>.

TRC, G. do. *Tabelas de Frete*. 2023. <http://www.guiadotrc.com.br/>. Acessado em: 11 de junho de 2023.

TURBAN, E. *Decision support systems and intelligent systems 7Th ed*. New jersey: Prentice Hall, 2005.

VIRILI, F.; SORRENTINO, M. The enabling role of web services in information system development practices: a grounded theory study. *Information Systems and e-Business Management*, Springer Science and Business Media LLC, v. 8, n. 3, p. 207–233, set. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10257-008-0097-x>.

WANG, K.; LAN, S.; ZHAO, Y. A genetic-algorithm-based approach to the two-echelon capacitated vehicle routing problem with stochastic demands in logistics service. *Journal of the Operational Research Society*, Informa UK Limited, v. 68, n. 11, p. 1409–1421, nov. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1057/s41274-016-0170-7>.

WANG, K.; SHAO, Y.; ZHOU, W. Matheuristic for a two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations in city logistics service. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier BV, v. 57, p. 262–276, dez. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.018>.

WANG, Y. et al. Two-echelon collaborative multi-depot multi-period vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, Elsevier BV, v. 167, p. 114201, abr. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.114201>.

WANG, Y. et al. Economic and environmental evaluations in the two-echelon collaborative multiple centers vehicle routing optimization. *Journal of Cleaner Production*, Elsevier BV, v. 197, p. 443–461, out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.208>.

- WANG, Z.; WEN, P. Optimization of a low-carbon two-echelon heterogeneous-fleet vehicle routing for cold chain logistics under mixed time window. *Sustainability*, MDPI - AG, v. 12, n. 5, p. 1–22, mar. 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.3390/su12051967⟩](https://doi.org/10.3390/su12051967).
- YU, S.; PUCHINGER, J.; SUN, S. Two-echelon urban deliveries using autonomous vehicles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier BV, v. 141, p. 102018, set. 2020. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102018⟩](https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102018).
- YU, V. F. et al. Design of a two-echelon freight distribution system in last-mile logistics considering covering locations and occasional drivers. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier BV, v. 154, p. 102461, out. 2021. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102461⟩](https://doi.org/10.1016/j.tre.2021.102461).
- YUE, M.; FENG, H. Optimization and practice of requirement analysis based on prototype portrait in software development process. *Journal of Computational Methods in Sciences and Engineering*, IOS Press, v. 21, n. 5, p. 1339–1347, nov. 2021. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.3233/jcm-214973⟩](https://doi.org/10.3233/jcm-214973).
- ZENG, Z. yang et al. A hybrid GRASPVND heuristic for the two-echelon vehicle routing problem arising in city logistics. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Limited, v. 2014, p. 1–11, 2014. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1155/2014/517467⟩](https://doi.org/10.1155/2014/517467).
- ZHANG, C.; HE, W.; XU, X. Application of decision support system based on data warehouse in sales management. In: *2012 International Symposium on Instrumentation & Measurement, Sensor Network and Automation (IMSNA)*. IEEE, 2012. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1109/msna.2012.6324619⟩](https://doi.org/10.1109/msna.2012.6324619).
- ZHOU, L. et al. A multi-depot two-echelon vehicle routing problem with delivery options arising in the last mile distribution. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 265, n. 2, p. 765–778, mar. 2018. Disponível em: [⟨https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011⟩](https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.011).

APÊNDICE A – SCRIPT TESTE DE USABILIDADE

SCRIPT: Teste de usabilidade para o módulo VRPDSS de planejamento de rede logística de e-commerce

Introdução

Em primeiro lugar: obrigado por concordar em participar dos testes de usabilidade do *VRPDSS*! O *VRPDSS* é um aplicativo web projetado para ajudar tomadores de decisão a testar cenários complexos de um modelo de otimização redes logísticas de *e-commerce*. O módulo '2E-CVRP' permite testar alterações nos satélites de distribuição de pacotes de *e-commerce* para avaliar desempenho nas entregas. Hoje você vai testar se o módulo '2E-CVRP' é fácil e compreensíveis de usar.

Não posso responder a perguntas específicas durante o teste; no entanto, posso esclarecer quaisquer instruções sobre uso. Antes de começarmos, perguntarei se tem alguma dúvida sobre as instruções. Por favor, narre seu processo de pensamento pensando em voz alta. Isso vai me ajudar a entender o que você está tentando fazer e melhorar a eficácia deste estudo. Estamos apenas testando a capacidade do aplicativo para ajudá-lo a completar sua tarefa. Todas as notas, documentação e comentários serão completamente anônimos.

Estudo de caso

Você é gerente de uma empresa de entrega de pacotes de *e-commerce* atuando na cidade de São Paulo/SP. **Sua última responsabilidade foi de rever a localização de satélites de distribuição** de algumas regiões da cidade visando otimizar o desempenho das rotas de entrega **considerando custos e tamanho da frota**.

Use o **VRPDSS** para ajudá-lo a entender melhor o comportamento da rede e responder suas dúvidas.

Sabendo que os pacotes a serem entregues são uniformes, com mesmo tamanho e volume

Qual a melhor seleção de satélites, dada uma frota de apenas bicicletas?

- Se utilizarmos no mínimo 3 satélites, qual melhor composição?
- Quão mais vantajoso é utilizar satélites mais centralizados versus satélites mais periféricos?
- E se utilizarmos no mínimo 1 satélite?
- Qual Impacto no tamanho de frota conforme se varia quantidade de satélites?

Qual a melhor seleção de satélites, dada uma frota de apenas Vans?

- Se utilizarmos no mínimo 3 satélites, qual melhor composição?
- Quão mais vantajoso é utilizar satélites mais centralizados versus satélites mais periféricos?
- E se utilizarmos no mínimo 1 satélite?
- Qual Impacto no tamanho de frota conforme se varia quantidade de satélites?

Qual a melhor seleção de satélites, dada uma frota Mista?

- Quão melhor é utilização de triciclos elétricos versus bicicletas?
- Qual melhor composição?
- Qual comportamento de custos variáveis por Km e por Hr conforme se altera tipo de frota?

Questões

Local: CISLOG **Data:** / / **Hora:** :

Minha Idade: [] 20-25 [] 25-30 [] 30-40 [] 40-50 [] 50+

Meu curso de graduação: []

Tenho conhecimento sobre Pesquisa de Operações (otimização e/ou simulação): []
Sim [] Não

Tenho [] anos de experiência estudando/trabalhando com logística e cadeia de suprimentos.

Complete o questionário classificando as frases usando uma escala de 5 pontos:

| Frase | Discordo Fortemente | Discordo | Neutro | Concordo | Concordo Fortemente | Não se Aplica |
|---|----------------------------|-----------------|---------------|-----------------|----------------------------|----------------------|
| O Sistema é fácil de usar | | | | | | |
| É fácil encontrar a informação que eu preciso | | | | | | |
| O Sistema tem uma interface agradável | | | | | | |
| Aprender a usar o Sistema é fácil | | | | | | |
| Eu fui capaz de tomar decisões com base nas informações e respostas apresentadas pelo sistema | | | | | | |
| O Sistema tem as características que eu esperava | | | | | | |
| Foi fácil fazer mudanças na rede (satélites e frota) | | | | | | |
| Pude identificar no Sistema o status da otimização do modelo | | | | | | |
| Os resultados do modelo apareceram rapidamente na página | | | | | | |
| Foi fácil identificar o impacto da mudança da rede no desempenho das entregas | | | | | | |
| Consegui identificar boas soluções e alternativas para rede | | | | | | |
| Eu fui capaz de comparar o desempenho da minha solução favorita com a atual | | | | | | |
| Identifiquei se a mudança da frota de veículos influencia desempenho da rede | | | | | | |
| Os gráficos do Sistema me auxiliam na avaliação de alternativas | | | | | | |
| O Sistema não tem bugs ou link/menu/página quebrados | | | | | | |