

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MICAELA INES CASTILLO ULLOA

**MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO DOS
VEÍCULOS NA COLETA DE RESÍDUOS DE SAÚDE: ESTUDO DE CASO
EM PONTA GROSSA-PR**

PONTA GROSSA

2023

MICAELA INES CASTILLO ULLOA

**MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO DOS
VEÍCULOS NA COLETA DE RESÍDUOS DE SAÚDE: ESTUDO DE CASO
EM PONTA GROSSA-PR**

**Mathematical model for vehicle routing optimization in healthcare waste
collection: case study in Ponta Grossa-PR**

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco

PONTA GROSSA

2023



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



**Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Ponta Grossa**



MICAELA INES CASTILLO ULLOA

**MODELO MATEMÁTICO PARA OTIMIZAÇÃO DE ROTEAMENTO DOS VEÍCULOS NA COLETA DE
RESÍDUOS DE SAÚDE: ESTUDO DE CASO EM PONTA GROSSA-PR**

Trabalho de pesquisa de mestrado apresentado como requisito para obtenção do título de Mestre Em Engenharia De Produção da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Área de concentração: Gestão Industrial.

Data de aprovação: 31 de Julho de 2023

Dr. Antonio Carlos De Francisco, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dr. Fabio Neves Puglieri, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Dra. Helenice De Oliveira Florentino Silva, Doutorado - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (Unesp)

Dr. Jovani Taveira De Souza, Doutorado - Universidade Estadual Paulista - Unesp

Thalita Monteiro Obal, - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 07/08/2023.

*Dedico este trabalho à minha linda família: meu pai,
minha mãe e minha irmã, que sempre me
incentivaram a buscar o melhor e a nunca desistir de
meus sonhos.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me proteger e mostrar cada dia o caminho certo.

Ao meus pais e à minha irmã, pelo seu amor, compreensão e conselhos que sempre me deram durante o tempo que estive fora de casa. Vocês são o meu porto seguro e minha maior motivação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Antonio Carlos de Francisco, agradeço por me guiar nessa trajetória, dedicando seu tempo, paciência e confiança. Seus conselhos foram de grande valia para o desenvolvimento deste trabalho. Desde o início do meu mestrado, você tem sido um grande amigo, me aconselhando e me ajudando em diversas situações. Levarei os ensinamentos que recebi de você durante esses anos pelo resto de minha vida.

Agradeço igualmente ao Prof. Dr. Fábio Neves Puglieri e a Profa. Dra. Thalita Monteiro Obal pelas excelentes contribuições que fizeram para encaminhar este estudo de maneira mais efetiva.

A equipe do LESP, composta por pessoas incríveis, trabalhar com vocês tem sido uma experiência inesquecível, especialmente porque a pesquisa se tornou uma parte importante da minha vida. Gostaria de agradecer, em especial, ao Diego, Cleiton e Vinicius, que se tornaram amigos tão próximos que sinto como se fossem irmãos. Obrigado por todo o apoio dado em cada momento. Às minhas amigas Carla e Geovana, muito obrigado pelos conselhos e por sempre me acalmarem em momentos de crise. Vocês se tornaram minha família aqui em Ponta Grossa.

Um agradecimento especial à empresa que permitiu a realização deste estudo de caso. Agradeço imensamente pelo tempo dedicado na resposta do questionário e no esclarecimento de todas as dúvidas, o que foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

Agradeço ao PAEC/GCUB pela oportunidade de realizar um mestrado inesquecível, à UTFPR pelos recursos, estrutura e excelência no ensino esses dois anos e ao PPGEF pelos excelentes professores e alunos dos quais aprendi muito.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, participaram desta etapa da minha vida acadêmica neste país acolhedor. A cada um de vocês, minha sincera gratidão por terem contribuído para que o mestrado se tornasse uma experiência acadêmica e pessoal enriquecedora.

Não é o mais forte que sobrevive, nem o mais
inteligente. Quem sobrevive é o mais disposto à
mudança.
(DARWIN, 2009).

RESUMO

O crescimento econômico global, o aumento da população, a rápida urbanização e a melhoria do padrão de vida têm culminado em um substancial incremento na quantidade de resíduos que as cidades precisam gerenciar. Dentro desse contexto, destaca-se a crescente geração de resíduos de saúde perigosos e infecciosos, tornando-se um desafio adicional o gerenciamento eficiente desses resíduos que engloba processos como separação, coleta, transporte e descarte, visando reduzir volume e quantidade sem prejudicar o meio ambiente e a saúde pública. No âmbito desses procedimentos, a coleta e o transporte emergem como elementos cruciais, dada a relevância de uma logística eficaz para garantir a coleta regular e segura desses resíduos, abrangendo múltiplos pontos de coleta. Dada a natureza peculiar desses resíduos, sua inadequada gestão representa um risco ambiental e para a segurança pública, reforçando a necessidade de uma logística eficiente para enfrentar tais desafios. Nesse contexto, o objetivo deste estudo é propor um modelo matemático destinado a otimizar a distância total percorrida por meio da técnica do roteamento de veículos para a coleta de resíduos de saúde. A abordagem se baseia nas características do Problema de Roteamento de Veículos Periódico (*PVRP*). Atingir este objetivo envolveu a condução de revisões sistemáticas da literatura sobre variantes do problema de roteamento e métodos de solução pertinentes. O modelo matemático que foi solucionado empregando dois algoritmos heurísticos: o algoritmo de construção *Clarke and Wright (CW)* e o algoritmo de otimização *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Para validar o modelo, foram empregados dados provenientes de uma empresa situada na cidade de Ponta Grossa, Paraná, especializada em coleta de resíduos, que categoriza seus clientes em dois grupos (grandes e pequenos), de acordo com a demanda e frequência de coleta. Os resultados dos testes revelaram conquistas significativas. Para clientes pequenos, o uso do algoritmo *CW* reduziu a distância total mensal em 31%, enquanto o algoritmo *PSO* alcançou uma redução ainda maior, de 41%. Nos casos de clientes grandes, as reduções foram de 17% com o *CW* e 22% com o *PSO*. Além disso, ambos algoritmos proporcionaram uma distribuição eficaz da distância total ao longo do mês. Ademais, a redução das distâncias contribuiu para diminuição de custos operacionais, bem como para a redução das emissões de poluentes, aprimorando a eficácia da coleta e beneficiando tanto a empresa quanto a comunidade. Em síntese, este trabalho alcançou seu objetivo proposto, ao resolver o modelo matemático empregando características distintas dos algoritmos heurísticos, combinando-os com dados da empresa e a revisão da literatura especializada.

Palavras-chave: roteirização periódica; heurística; otimização de rotas; coleta de resíduos de saúde.

ABSTRACT

Global economic growth, population increase, rapid urbanization, and improved living standards have led to a substantial increase in the waste that cities need to manage. Within this context, the growing generation of hazardous and infectious health waste stands out, making it an additional challenge to efficiently manage this waste, which encompasses processes such as separation, collection, transportation, and disposal, aiming to reduce volume and quantity without harming the environment and public health. Within these procedures, collection, and transportation emerge as crucial elements, given the relevance of effective logistics to ensure regular and safe collection of this waste, covering multiple collection points. Given the peculiar nature of these wastes, their inadequate management represents an environmental and public safety risk, reinforcing the need for efficient logistics to address such challenges. In this context, this study aims to propose a mathematical model to optimize the total distance traveled through the vehicle routing technique for the collection of healthcare waste. The approach is based on the characteristics of the Periodic Vehicle Routing Problem (*PVRP*). Achieving this objective involved conducting systematic literature reviews on variants of the routing problem and relevant solution methods. The mathematical model was solved using two heuristic algorithms: the Clarke and Wright (*CW*) construction algorithm and the Particle Swarm Optimization (*PSO*) algorithm. To validate the model, data from a company located in the city of Ponta Grossa, Paraná, which specializes in waste collection, and categorizes its customers into two groups (large and small), according to the demand and frequency of collection, were used. The test results revealed significant achievements. For small customers, using the *CW* algorithm reduced the total monthly distance by 31%, while the *PSO* algorithm achieved an even greater reduction of 41%. The reductions were 17% with *CW* and 22% with *PSO* for large clients. In addition, both algorithms effectively distributed the total distance over the month. Furthermore, the reduction of spaces contributed to lower operating costs and the reduction of pollutant emissions, improving the effectiveness of collection, and benefiting both the company and the community. In summary, this work achieved its proposed objective by solving the mathematical model using distinctive features of heuristic algorithms, combining them with company data, and reviewing specialized literature.

Keywords: periodic routing; heuristics; route optimization; healthcare waste collection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma dos passos delineados para a condução da dissertação	21
Figura 2 – Representação gráfica da abordagem utilizada para <i>VRP</i>	24
Figura 3 – Fatores do Problema de Roteamento de Veículos	25
Figura 4 – Variantes do <i>VRP</i>	26
Figura 5 – Métodos de solução aplicados a <i>PVRP</i>	33
Figura 6 – Etapas para o desenvolvimento do modelo.....	37
Figura 7 – Processo de seleção de artigos para identificação da variante de <i>VRP</i>	38
Figura 8 – Processo de seleção de artigos das soluções aplicadas para <i>PVRP</i>	41
Figura 9 - Processo de coleta dos resíduos	45
Figura 10 – Fluxograma do <i>CW</i>	54
Figura 11 – Fluxograma do <i>PSO</i>	56
Figura 12 – Rotas dos Clientes pequenos – Primeira semana.....	69
Figura 13 – Rotas dos clientes grandes – Primeira semana	72
Figura 14 – Comparação dos resultados de distância percorrida (km) entre os algoritmos <i>CW</i> e <i>PSO</i>	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tipos de <i>VRP</i> - portfólio final de artigos	30
Quadro 2 – Métodos de soluções exatos aplicados ao <i>PVRP</i>	34
Quadro 3 – Métodos de soluções heurísticas aplicados ao <i>PVRP</i>	34
Quadro 4 – Parâmetros utilizados no <i>PVRP</i> - portfólio final de artigos	46
Quadro 5 – Restrições utilizadas no <i>PVRP</i> - portfólio final de artigos	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição de clientes atendidos por cidade	59
Tabela 2 – Quantidade de resíduos coletados dos clientes grandes (kg).....	60
Tabela 3 – Quantidade de resíduos coletados dos clientes pequenos (kg).....	60
Tabela 4 – Tipos de clientes e frequência de visita.....	62
Tabela 5 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo CW – Clientes pequenos	63
Tabela 6 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo CW – Clientes grandes	65
Tabela 7 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo PSO – Clientes pequenos	67
Tabela 8 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo PSO – Clientes grandes	68
Tabela 9 – Resultados por semana do algoritmo CW e PSO - Clientes pequenos	75
Tabela 10 – Resultados por semana do algoritmo CW e PSO - Clientes grandes	76
Tabela 11 – Comparação da distância percorrida por tipo de algoritmo e tipo de cliente	78

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABC	<i>Artificial Bee Colony Algorithm</i>
ABEPRO	Associação Brasileira de Engenharia de Produção
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACVRP	<i>Asymmetric Capacitated Vehicle Routing Problem</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
B&B	<i>Branch and Bound</i>
CG	<i>Column Generation</i>
CO2	Dióxido de carbono
CVRP	<i>Capacited Vehicle Routing Problem</i>
CW	<i>Clarke e Wright</i>
DBH	<i>Decomposition Based Heuristic</i>
DPSO	<i>Discrete Particle Swarm Optimization</i>
DVRP	<i>Dynamic Vehicle Routing Problem</i>
Ee-VRP	<i>Eco-efficient Vehicle Routing Problem</i>
GIS	<i>Spatial Geographic Information System</i>
GSPVRP	<i>Green Split Pick-up Vehicle Routing Problem</i>
HBPI	<i>Heuristics Based on Integer Programming</i>
HWCVRP	<i>Healthcare Waste Collection Vehicle Routing Problem</i>
IPSO	<i>Improved Particle Swarm Optimization</i>
IVNS	<i>Improved Variable Neighborhood Search</i>
Kg	Quilograma
Kg/dia	Quilograma por dia
Km	Quilômetro.
LESP	Laboratório de Estudos em Sistemas de Produção Sustentável
LRPTW	<i>Location-Routing Problem with Time Windows</i>
M3CVRP	<i>Multidepot Multidisposal-Facility Multitrip CVRP</i>
MDPVRPI	<i>Multi-Depot Periodic Vehicle Routing Problem with Inter-Depot Routes</i>
MDVRP	<i>Multi-depot Vehicle Routing Problem</i>
ME	<i>Model Enhancement Technique</i>
MHA	<i>Modular Heuristic Algorithm</i>
MILP	<i>Mixed integer linear programming</i>
MOSA-ACO	<i>Multi Objective Simulate Annealing - Ant Colony Optimization</i>
MTVRPTW-	<i>Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows and</i>
UQD	<i>Unloading Queue at Depot</i>
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
OVRP	<i>Open Vehicle Routing Problem</i>
PLCVRP	<i>Periodic Load-dependent Capacitated Vehicle Routing Problem</i>
PM	<i>PubMed</i>
PPGEP	Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

PR	Paraná
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis</i>
PSO	<i>Particle Swarm Optimization</i>
PVRP	<i>Periodic Vehicle Routing Problem</i>
PVRP-IF	<i>Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities</i>
PVRPTW	<i>Periodic VRP with Time Windows</i>
RECWA	<i>Randomized Extended Clarke and Wright Algorithm</i>
RGRASP	<i>Greedy Randomized Adaptive Search Procedure</i>
RRVRP	<i>Rollon-rolloff vehicle routing problem</i>
RSS	Resíduos de saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SD	<i>Science Direct</i>
SDVRP	<i>Split Delivery VRP</i>
TS	<i>Tabu Search</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i>
VNS	<i>Variable Neighborhood Search</i>
VNS-RLS	<i>VNS-Reinforcement Learning</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPB	<i>VRP with Backhauls</i>
VRP-IF	<i>Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities</i>
VRPPD	<i>VRP with Picks and Deliveries</i>
VRPSPD	<i>Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery</i>
VRPTW	<i>VRP with Time Windows</i>
WCVRP	<i>Waste Collection Vehicle Routing Problem</i>
WoS	<i>Web of Science</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivo	16
1.1.1	Objetivos Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	Justificativa da pesquisa	17
1.3	Delimitação, área de concentração e linha de pesquisa	19
1.4	Estrutura do trabalho	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1	Gestão de resíduos de saúde	22
2.2	Roteirização de veículos	23
2.3	Métodos para resolução do problema de roteamento de veículos	27
2.3.1	Métodos Exatos	27
2.3.2	Métodos Heurísticos	28
2.3.3	Métodos Metaheurísticos	29
2.4	Trabalhos relacionados as variantes do <i>VRP</i> para otimização da coleta de resíduos sólidos	30
2.5	Trabalhos relacionados das abordagens exatos e heurísticos para o Problema de Roteamento Periódico de Veículos (<i>PVRP</i>)	33
3	METODOLOGIA	37
3.1	Etapa 1: Identificação da variante de <i>VRP</i> na coleta de resíduos	37
3.1.1	Primeira revisão da literatura	37
3.1.2	Variante do Problema de Roteamento de Veículos selecionado	39
3.2	Etapa 2: Identificação do método de solução aplicada para a variante selecionada	40
3.2.1	Segunda revisão da literatura	40
3.2.2	Definição do método de solução para o modelo proposto	42
3.3	Etapa 3: Estruturação do modelo	44
3.3.1	Descrição do Problema	44
3.3.2	Definição dos parâmetros e restrições	46
3.3.3	Formulação Matemática	51
3.3.4	Heurística construtiva <i>Clarke and Wright</i>	53
3.3.5	Heurística de otimização <i>Particle Swarm Optimization (PSO)</i>	55
3.4	Etapa 4: Implementação computacional do modelo	57
3.5	Etapa 5: Aplicação do modelo	58

4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	Resultados gerados pela heurística construtiva de <i>Clarke and Wright</i> (CW).....	63
4.2	Resultados da heurística de otimização <i>Particle Swarm Optimization</i> (PSO).....	66
4.3	Discussões	75
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
5.1	Conclusão	80
5.2	Limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros	82
	REFERÊNCIAS.....	84
	APÊNDICE A - Questionário de diagnóstico.....	95
	APÊNDICE B - Quantidade de resíduos a serem coletados por semana e por tipo de cliente	97
	APÊNDICE C - Mapas de rotas dos clientes por semana	104

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, a acelerada urbanização e o desenvolvimento econômico têm sido impulsionadores significativos para o aumento exponencial no volume de resíduos produzidos em âmbito global, especialmente nas áreas urbanas (HASHEMI-AMIRI *et al.*, 2023). O Brasil não escapa dessa realidade, e de acordo com os dados divulgados pela Abrelpe (2022) referentes ao ano 2022, registrou-se um total de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas de resíduos gerados, correspondendo a uma média de 224 mil toneladas diárias.

Dentre a ampla variedade de resíduos gerados, vale destacar os resíduos dos serviços de saúde (RSS), cuja demanda tem experimentado um crescimento significativo (MARTINS *et al.*, 2021). Conforme o estudo de Chauhan, Jakhar e Chauhan (2021), a quantidade de resíduos de saúde perigosos e infecciosos tem apresentado um aumento dentro do total de resíduos, resultando do contínuo crescimento populacional, de doenças crônicas e do envelhecimento da população. Estes resíduos se destacam pela presença de microrganismos nocivos, representando riscos potenciais de infecção para pacientes, profissionais de saúde e a população em geral, além de constituírem uma ameaça para o meio ambiente e à saúde pública (ZAMPARAS *et al.*, 2019; GAO *et al.*, 2021; ERDEM, 2022; GREENHEALTH, 2020).

Antes mesmo da pandemia de Covid-19, estudos já haviam evidenciado a relevância da quantidade de resíduos de saúde gerados, conforme foi apontado por Eren e Tuzkaya (2021). Entretanto, a situação agravou-se consideravelmente após o início da pandemia em 2020, culminando em um drástico aumento na produção de resíduos médicos, representando um problema ambiental e de saúde crítico em escala global (SANGKHAM, 2020; MOSALLANEZHAD *et al.*, 2021).

A gestão adequada desses resíduos é fundamental para os estabelecimentos geradores, tais como hospitais, clínicas, laboratórios, farmácias, centros pesquisa e bancos de sangue (TASLIMI *et al.*, 2020; NEVES *et al.*, 2022). Portanto, enfatiza-se a importância de realizar cuidadosamente os processos de separação, coleta, armazenamento, transporte, processamento e descarte adequado, visando minimizar os riscos e controlar a propagação de epidemias infecciosas (ERDEM, 2022).

Dentro os diversos processos envolvidos na gestão de resíduos de saúde, destacam-se como elementos fundamentais a coleta e o transporte. Segundo Khan *et*

al. (2019), é essencial que essas práticas sejam realizadas de forma segura e monitorada, por meio do uso de equipamentos adequados. Além disso, é importante buscar soluções mais sustentáveis para garantir canais apropriados para a coleta e estações de descarte, conforme apontado por Rautela *et al.* (2021). Dessa forma, é possível promover uma gestão eficiente, segura e ambientalmente responsável dos resíduos de saúde.

Nesse contexto, o Problema de Roteamento de Veículos, conhecido como *VRP* por suas siglas em inglês (*Vehicle Routing Problem*) destaca-se como uma técnica da pesquisa operacional para solucionar problemas de otimização combinatória, o qual desempenha um papel fundamental na análise e tomada de decisões para a definição de rotas e frotas de forma confiável e analítica (AKBARPOUR *et al.*, 2021).

De acordo com o estudo de Rezaei *et al.* (2023), o *VRP* é reconhecido como um problema naturalmente combinatório e matematicamente classificado como NP-difícil (*Non-deterministic polynomial time*). Isso significa que o tempo necessário para encontrar uma solução aumenta exponencialmente à medida que o tamanho de amostra incrementa. Para Niranjani e Umamaheswari, (2022), o *VRP* tem como objetivo determinar as rotas mais eficientes para uma frota de veículos que precisa visitar múltiplos pontos intermediários, considerando parâmetros e critérios relevantes em cada contexto específico conforme também apontado por Rahmanifar *et al.* (2023).

Diante disso, o presente trabalho pretende responder a seguinte questão de pesquisa: **Como otimizar as distâncias percorridas pelos veículos coletores de resíduos de saúde?**

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivos Geral

Propor um modelo matemático para otimizar o roteamento dos veículos responsáveis pela coleta de resíduos de saúde.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Definir a variante de *VRP* mais adequada para a coleta de resíduos de saúde;

- Identificar o método de solução mais apropriado para a variante de *VRP* escolhida;
- Desenvolver o modelo de roteamento para a coleta de resíduos de saúde;
- Realizar a implementação computacional para executar o modelo proposto;
- Aplicar o modelo proposto em uma empresa localizada na cidade de Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

1.2 Justificativa da pesquisa

No Brasil, em 2020, a quantidade de resíduos gerados atingiu aproximadamente 82,5 milhões de toneladas, o que representa um crescimento de 379 kg em 2020 para 390 kg por habitante ao ano em 2021 (ABRELPE, 2020; ABELPRE, 2021). Com esse contínuo aumento, torna-se ainda mais crítico a necessidade de um planejamento adequado para o manejo de RSS.

Por outro lado, Kenny e Priyadarshini (2021), afirmam que a poluição é a principal causa ambiental de doenças e mortes prematuras em todo o mundo, e o setor saúde é reconhecido como um contribuinte significativo para a chuva ácida, emissões de gases de efeito estufa e poluição atmosférica. Observou-se que ineficiências nos processos de transporte e de disposição em aterros sanitários contribuem para a produção de contaminantes transportados pelo ar, como as dioxinas que aumentam a probabilidade de ocorrência de doenças (LANDRIGAN *et al.*, 2018).

Nesse contexto, é fundamental garantir a coleta e o transporte adequados dos RSS, visando a um gerenciamento eficiente desses resíduos. Uma abordagem que pode melhorar essa gestão é a adoção do *VRP*. Esse recurso permite otimizar as rotas e sequências de coleta, levando em conta a capacidade dos veículos, restrições de tempo e demandas específicas para cada ponto de coleta (AKBARPOUR *et al.*, 2021).

A aplicação do *VRP* na coleta dos RSS traz benefícios econômicos ao reduzir os custos operacionais através da otimização das distâncias percorridas. Segundo Dereci e Karabekmez (2022), é uma solução que aumenta a eficiência das empresas responsáveis pela coleta desses resíduos, garantindo um serviço adequado, pontual e, conseqüentemente, aprimora a qualidade do serviço prestado.

Além dos benefícios econômicos, é importante destacar os impactos ambientais abordados neste trabalho. De acordo com o Instituto McKinsey Global (2020), as mudanças climáticas têm implicações significativas na geopolítica, nos negócios e na economia global. Para minimizar os impactos ambientais, torna-se essencial reduzir as emissões dos principais gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono (CO₂). Nesse sentido, a aplicação do modelo de *VRP* contribui para a gestão mais sustentável do processo de coleta de resíduos de saúde, possibilitando a otimização das rotas e a redução da emissão de poluentes e consumo de combustíveis. Além disso, ao planejar as rotas de forma eficiente, o *VRP* permite a utilização mais racional dos recursos como combustíveis e energia, resultando em menos combustível sendo consumido e, conseqüentemente, reduzindo o consumo de recursos não renováveis.

A justificativa social para a utilização do *VRP* na gestão de resíduos de saúde está relacionada à segurança durante o processo de coleta, transporte e descarte desses resíduos, de acordo com o nível de risco envolvido (TIRKOLAE; AYDIN, 2021). Nesse contexto, a aplicação do *VRP* permite definir rotas seguras e evitar áreas de alto risco, contribuindo tanto para a segurança dos motoristas quanto para a população envolvida na coleta de resíduos de saúde. Isso é alcançado ao reduzir o tempo de exposição dos resíduos e ao prevenir possíveis vazamentos, derramamentos ou acidentes durante o transporte.

O estudo proposto tem grande relevância ao servir como propulsor de novos modelos de aplicação dos problemas de roteamento de veículos para a coleta de diferentes tipos de resíduos, levando em consideração as características específicas de cada problema. Além disso, a pesquisa terá relevância prática ao fornecer um arcabouço para o desenvolvimento de novos métodos ligados à eficiência operacional. Ao utilizar métodos e algoritmos eficientes para resolver o *VRP*, é possível reduzir custos operacionais, aumentar a produtividade e o uso eficiente dos recursos. Vale ressaltar que este estudo, apesar de utilizar informações de resíduos de saúde de uma empresa em Ponta Grossa como exemplo, pode ser aplicado a outros tipos de resíduos e setores, desde que sejam fornecidos dados de entrada apropriados.

Além disso, a utilização de veículos mais eficientes em termos de consumo de combustível possibilita a melhoria de mobilidade urbana e a redução do congestionamento, mitigando os impactos negativos do transporte nas cidades. Esses ganhos são fundamentais para o cumprimento dos Objetivos de Desenvolvimento

Sustentável (ODS), estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU). Dos 17 ODS, esta pesquisa está vinculada com os ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis) e ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), tendo em vista que a otimização das rotas contribui para a redução do consumo de combustíveis fósseis, mitigando as emissões de gases de efeito estufa e promovendo práticas sustentáveis de gerenciamento de resíduos.

Por fim, do ponto de vista acadêmico, este trabalho contribui para a ampliação do conhecimento ao desenvolver uma metodologia inovadora para o roteamento de veículos na gestão de resíduos de saúde. O estudo amplia os fundamentos já existentes nessa área, demonstrando a aplicabilidade da nova metodologia e sua contribuição cumulativa para o conhecimento científico. Além disso, o modelo proposto pode ter grande utilidade para as partes interessadas, contribuindo significativamente no planejamento de projetos e na tomada de decisões.

Diante disso, a utilização do modelo de *VRP* na coleta de resíduos de saúde se apresenta como uma abordagem estratégica e alternativa eficiente para garantir a adequada gestão no transporte desses resíduos. Essa abordagem permite otimizar recursos, reduzir impactos ambientais e aprimorar a segurança e qualidade do serviço prestado, considerando aspectos econômicos, ambientais, sociais e acadêmicos, o *VRP* se destaca como uma solução completa e integrada para a gestão de resíduos de saúde.

Após a descrição da justificativa, a delimitação da pesquisa será apresentada na próxima seção.

1.3 Delimitação, área de concentração e linha de pesquisa

Inicialmente, é importante destacar que este trabalho está inserido na área de Engenharia de Sustentabilidade, que faz parte do contexto mais amplo da Engenharia de Produção, de acordo com a definição da Abepro (2008). Essa área reflete o propósito central deste estudo, que é a otimizar as rotas de coleta de resíduos por meio do modelo de roteamento dos veículos, com o intuito de minimizar as distâncias percorridas.

Além disso, a presente dissertação é coerente com a área de concentração do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção (PPGEP): Gestão Industrial. Essa área de concentração tem o objetivo de desenvolver estudos e disciplinas nas áreas de operações e engenharia de produtos, pesquisa operacional,

engenharia de qualidade, engenharia econômica, engenharia de sustentabilidade e outras áreas correlatas, que abrangem o campo da Engenharia de Produção.

Como parte da Linha de Pesquisa em Gestão do Conhecimento e Inovação, este documento apresenta descobertas inovadoras e relevantes no campo da otimização de rotas de coleta de resíduos. Por meio de uma revisão sistemática de literatura, seguida pela análise de resultados e discussão, foram alcançados avanços científicos significativos. Uma contribuição inovadora deste estudo é a proposta de um modelo complementar para a otimização das rotas de coleta.

Este estudo foi realizado no grupo de pesquisa do Laboratório de Estudos em Sistemas de Produção Sustentável (LESP), o qual desempenha um papel relevante na produção de conhecimento e inovação. O LESP é reconhecido pela sua dedicação ao desenvolvimento e aplicação de estudos relevantes em diversos campos da Engenharia de Produção e desempenho industrial.

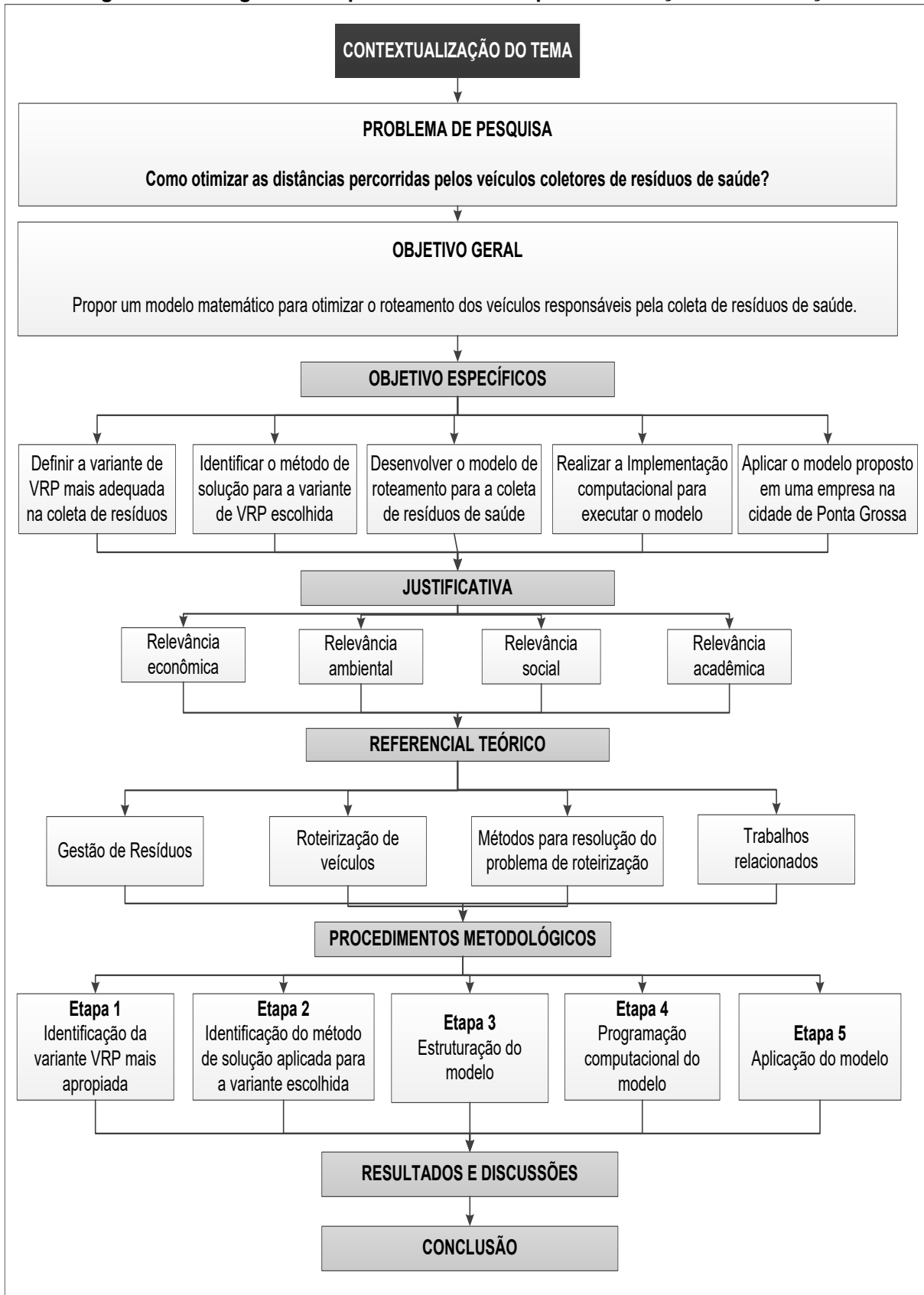
Destaca-se que o LESP estabelece parcerias com organizações industriais, participa de congressos nacionais e internacionais de relevância, presta serviços de consultoria para empresas, oferece cursos com foco em sustentabilidade, realiza conferências em colaboração com universidades internacionais e publica em periódicos e revistas de alcance nacional. Suas atividades têm impacto internacional e contribuem para o avanço da pesquisa tanto no contexto nacional quanto no âmbito global.

1.4 Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos. O primeiro apresenta a contextualização do tema, trazendo o problema de pesquisa, os objetivos e a justificativa do estudo. O capítulo 2 aborda a fundamentação teórica e os antecedentes necessários para a melhor compreensão do presente estudo. Na sequência, a metodologia é apresentada no capítulo 3, enquanto os resultados e discussão da dissertação são estruturados no capítulo 4. Por fim, as considerações finais, limitações e oportunidades para estudos futuros estão descritas no capítulo 5.

Para fornecer uma visão geral do desenvolvimento deste estudo, a Figura 1 ilustra um fluxograma dos passos delineados nesta dissertação.

Figura 1 – Fluxograma dos passos delineados para a condução da dissertação



Fonte: Autoria própria (2023)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, serão apresentadas diferentes abordagens de pesquisa relacionadas às áreas discutidas neste estudo. Os temas abrangem a gestão de resíduos de saúde, roteirização de veículos, métodos de resolução para o planejamento de rotas, estudos relacionados que abordam problemas de roteamento com ênfase em resíduos sólidos, bem com estudos relevantes sobre os métodos de solução utilizados para o problema de roteamento periódico de veículos, tanto com base em exatas quanto heurísticas

2.1 Gestão de resíduos de saúde

A gestão dos resíduos urbanos tem se tornado uma questão cada vez mais relevante, devido ao crescimento econômico global, aumento da população e a rápida urbanização, conforme o destacado por Mohamed *et al.*, (2020). Nesse contexto, os resíduos de saúde emergem como uma preocupação significativa para a Organização Mundial da Saúde (OMS).

A OMS classifica esses resíduos de saúde em duas categorias principais: “não perigosos”, que representam de 75% a 95% do total, e “perigosos”, que compreendem entre 5% e 25%, e estima-se que, em 2023, os hospitais sejam responsáveis por 70% do total dos resíduos de saúde gerados, enquanto o restante provém de laboratórios médicos, centros de pesquisa, necrotérios, laboratórios de pesquisa, testes em animais e bancos de sangue. Dentro dos resíduos perigosos, a OMS os classifica em sete grupos distintos, considerando suas características e níveis de risco. Esses grupos incluem resíduos patológicos, infectantes, perfurocortantes, radioativos, químicos, citotóxicos e farmacêutico (WIN *et al.*, 2019; PADMANABHAN; BARIK, 2019).

Em relação aos resíduos de saúde, é fundamental definir estratégias e metodologias eficientes para o seu gerenciamento (AKBARPOUR *et al.*, 2021). Esses resíduos contêm diversas bactérias patogênicas que podem abrigar agentes infecciosos e vírus, representando sérios riscos tanto para o meio ambiente quanto à saúde pública (EREN e TUZKAYA ,2021; KAYA, 2023).

Nesse contexto, é imprescindível que a gestão de resíduos tenha como objetivo aprimorar todos os processos envolvidos: coleta, transporte, armazenamento temporário e descarte, reduzindo seu volume e quantidade sem prejudicar o meio

ambiente e a saúde. De acordo com Sulemana *et al.* (2018), a gestão de resíduos não se limita apenas à coleta ou ao encaminhamento dos materiais, mas requer atenção cuidadosa para minimizar riscos e controlar a propagação de epidemia infecciosas. A manipulação adequada e apropriada dos resíduos de saúde desempenha um papel fundamental na prevenção de impactos negativos (ERDEM, 2022). Ao implementar práticas seguras e eficazes de gerenciamento, é possível reduzir a disseminação de doenças, protegendo a saúde das pessoas e do meio ambiente, considerando que, estes resíduos são compostos por diversas bactérias patogênicas e, contém a presença de agentes infecciosos e vírus. Representando riscos conforme Eren e Tuzkaya (2021).

No contexto brasileiro, as principais leis relacionadas ao tema são a Resolução nº 358/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente e a Resolução RDC nº 222/2018 da ANVISA. Portanto, os RSS são classificados de acordo com o seu potencial de risco e suas características para cada grupo: Grupo A (resíduos infectantes), B (resíduos químicos), C (resíduos radioativos), D (resíduos em geral) e E (resíduos perfurocortantes).

Para os resíduos infectantes, uma subdivisão específica foi estabelecida de acordo com suas características, chamada de subgrupos, incluindo: A1 (alto risco potencial), A2 (partes do corpo animal infectadas por um microrganismo relevante), A3 (partes anatômicas humanas), A4 (baixo risco potencial) e A5 (príon desperdício). De modo particular, o subgrupo A4 inclui os resíduos infectantes que podem ser encaminhados para aterros sanitários sem a necessidade de um tratamento prévio (Brasil, 2018).

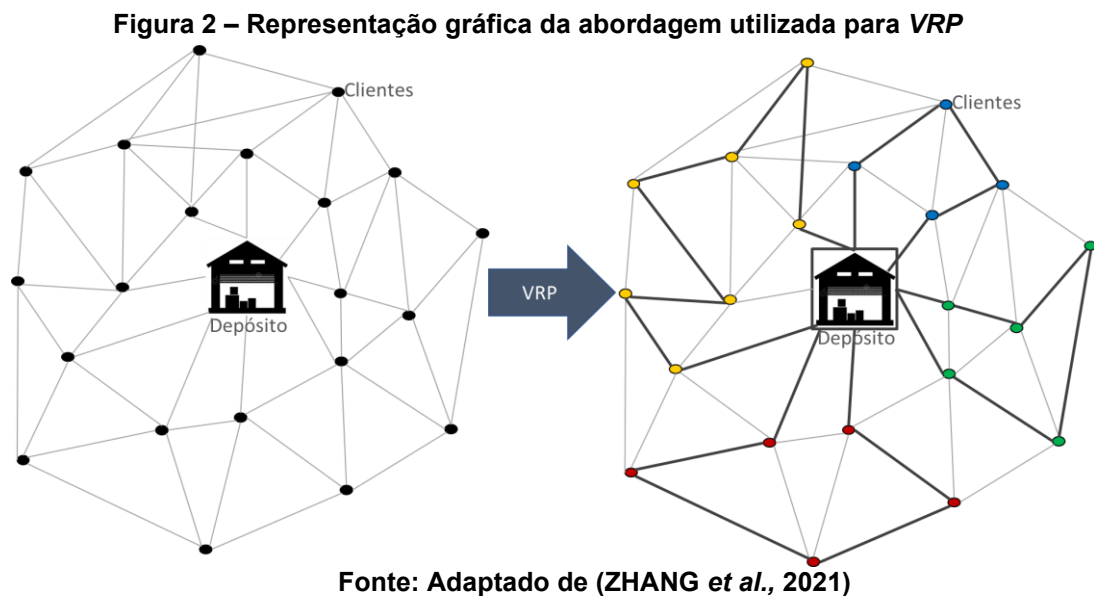
No campo de gerenciamento de resíduos, diversas técnicas de otimização são empregadas para resolver problemas de planejamento de transporte em diferentes níveis, proporcionando soluções eficazes por meio desses métodos (ERDEM, 2022). Uma dessas técnicas amplamente utilizadas é a roteirização de veículos, que será detalhada na próxima seção.

2.2 Roteirização de veículos

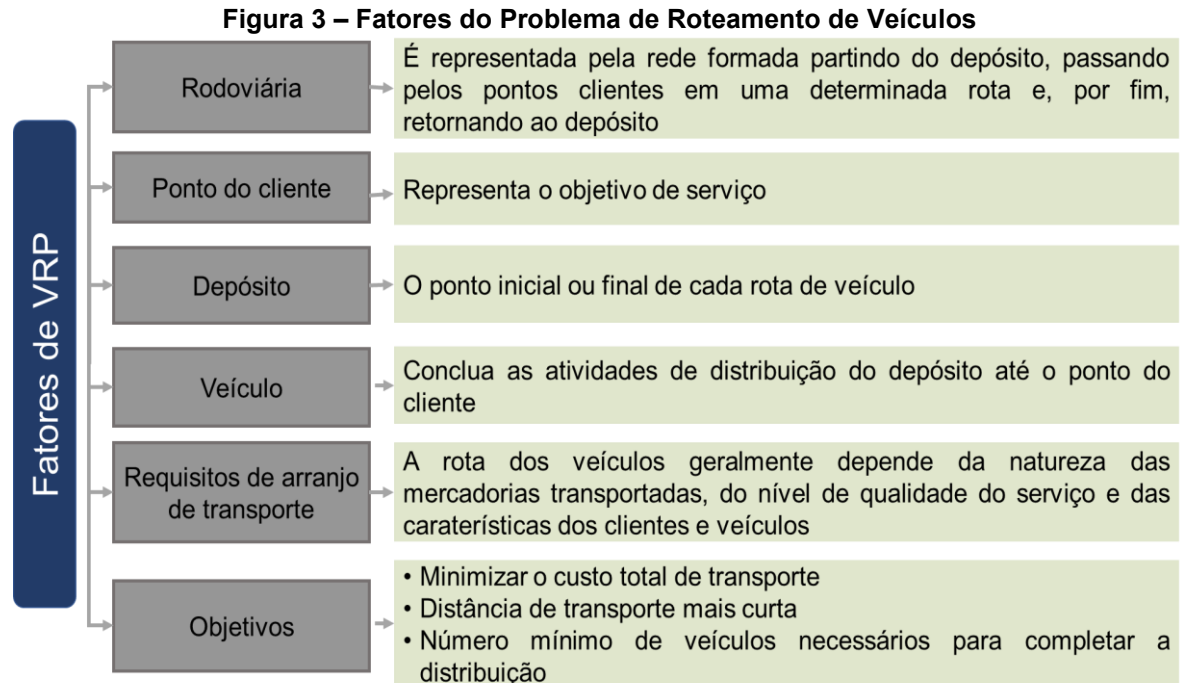
O Problema de Roteamento de Veículos (*VRP*) em termos matemáticos é um problema naturalmente combinatório da classe NP-difícil, o que significa que o tempo de solução necessário para a resolução aumenta exorbitantemente com o tamanho da amostra. Seu objetivo é encontrar a melhor rota entre o depósito central

e os armazéns, considerando as restrições dos veículos (FREY *et al.*, 2023). Embora a questão principal seja tipicamente encontrar a rota mais curta, também é possível definir o problema com outros objetivos, como minimizar o número de veículos utilizados, o custo ou a duração do trajeto.

De acordo com Dereci e Karabekmez (2022), as restrições do problema estão, em geral, associadas aos veículos, clientes ou ao próprio processo. Em razão desses fatores, foram introduzidos vários tipos de *VRP* para lidar com diferentes cenários. O *VRP* consiste na busca por uma rota de entrega ideal que parte de um ou mais pontos de origem e percorre diversos pontos de clientes em diferentes locais situados em diferentes localidades, conforme exemplificado na Figura 2 (GANESH *et al.*, 2007).



O *VRP* envolve um ponto de origem conhecido como depósito, que pode ser único o múltiplo, e diversos pontos de entrega ou coleta a serem atendidos. Segundo Eksioglu *et al.* (2009) e Pillac *et al.* (2013), o *VRP* geralmente é definido em variáveis $G = (\gamma, \mathcal{E}, \mathcal{C})$, onde $\gamma = \{v_0, \dots, v_n\}$ é o conjunto de vértices $\mathcal{E} = \{(v_i, v_j) | (v_i, v_j) \in \gamma^2, i \neq j\}$ é o arco definido; $\mathcal{C} = (c_{ij})_{v_i, v_j \in \mathcal{E}}$, é uma matriz de custo definida sobre \mathcal{E} , representando distâncias, tempos de viagem ou custos de viagem. Nesse sentido, o *VRP* é constituído, principalmente, por uma ou mais combinações dos seguintes fatores:



Fonte: Adaptado de ZHANG *et al.* (2021)

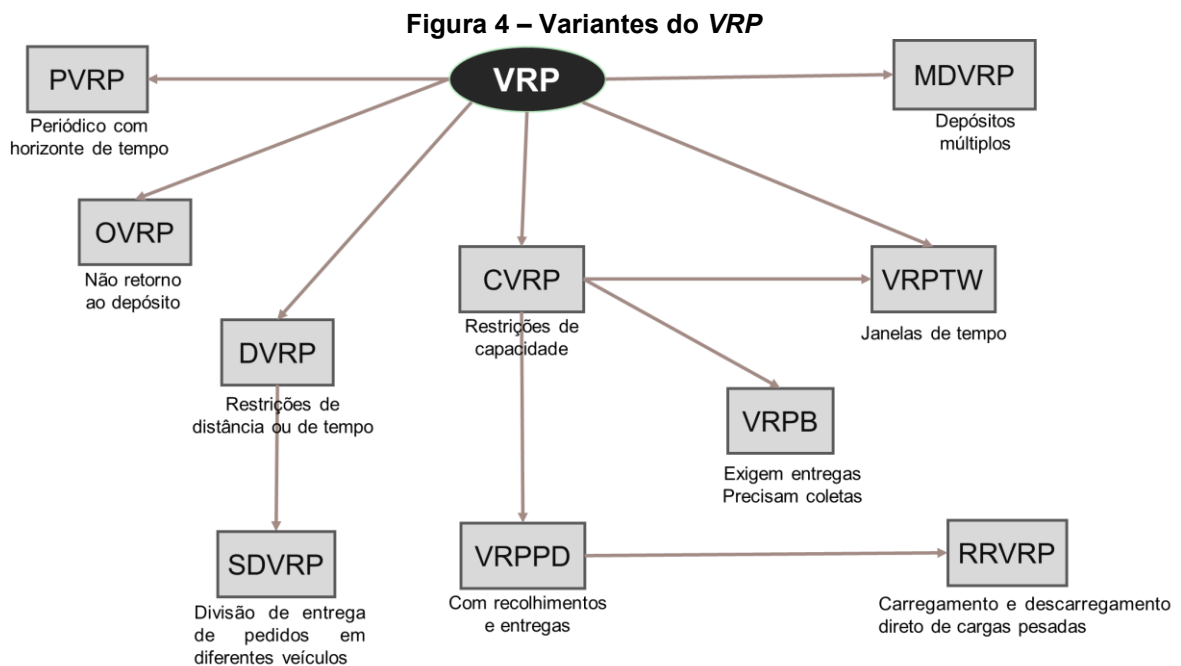
Dantzig e Ramser (1959) são considerados pioneiros na introdução do Problema de Despacho de Caminhões, ao modelá-lo como uma frota de veículos homogêneos responsáveis por atender à demanda de postos de gasolina a partir de um hub central, buscando percorrer a menor distância possível. Essa abordagem foi introduzida como uma versão generalizada do Problema de Caixeiro Viajante (ou *Traveling Salesman Problem TSP* em inglês), descrito por (FLOOD, 1956). Embora, o modelo matemático proposto não tenha sido amplamente aplicado na prática, ele oferece uma solução quase ótima para o problema.

Com o passar dos anos, o Problema do Caixeiro Viajante tem evoluído significativamente, incorporando novas restrições que permitem uma melhor representação dos diversos tipos de problemas relacionados a roteamentos envolvendo veículos e pessoas, conforme destacado por Pillac *et al.* (2013).

Para atender às demandas de um mercado cada vez mais exigente e competitivo, torna-se necessário realizar melhorias no problema básico de *VRP*. Nesse sentido, pesquisadores têm ampliado o escopo deste problema, introduzindo novas restrições e flexibilizando as existentes, considerando o tamanho da frota de veículos e a definindo rotas de formas distintas (GANESH *et al.*, 2007).

Tais melhorias, além de proporcionarem uma gestão mais eficiente, asseguram a redução de custos operacionais e elevam a competitividade das empresas. Outro aspecto relevante é que as pesquisas recentes, como as de Tan e

Yeh (2021), têm se concentrado em diversas externalidades negativas do transporte, incluindo emissões de carbono e a duração das viagens, considerando o estudo da parte ambiental. Com o tempo, surgiram diferentes variações do *VRP* a fim de atender a novas situações encontradas, as quais são apresentadas na Figura 4, que mostra as siglas das variantes e suas características, destacando as diferenças entre elas, este contexto geral evidencia as variantes do *VRP* que foram criadas ao longo do tempo.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Nesta seção, foram apresentadas de forma geral alguns das variantes do problema de roteamento de veículos aplicadas. É importante compreender a base do problema de roteirização simples e como ele evoluiu através dos estudos conduzidos por diversos pesquisadores ao longo do tempo.

No contexto deste estudo, será abordada a variante *Periodic Vehicle Routing Problem (PVRP)*, considerando suas características específicas aplicadas à coleta dos resíduos de saúde que será desenvolvida no decorrer do trabalho. Por outro lado, se deve considerar que para solucionar essas variantes, existem diversos métodos apropriados para cada característica específica, que serão apresentados na próxima seção.

2.3 Métodos para resolução do problema de roteamento de veículos

As diversas variantes do *VRP* têm impactado diretamente no aumento do número de clientes e tipos de veículos, o que exige a adoção de algoritmos de otimização para desempenhar um papel fundamental na prestação eficaz de atendimento ao cliente e na realização de operações eficientes. Drexler (2012) destaca que os *VRPs* são frequentemente modelados como grafos ou redes e formulados como programas inteiros mistos. Porém, Braekers, Ramaekers e Van Nieuwenhuysen (2016) ressaltaram que os algoritmos exatos são eficientes apenas em instâncias de pequeno porte. No entanto, para solucionar o *VRP* em aplicações práticas considerando dados reais, heurísticas e metaheurísticas são mais adequadas.

Conforme ressaltado por Konstantakopoulos *et al.* (2020), é de vital importância que as empresas reconheçam adequadamente não apenas as variantes e parâmetros que influenciam suas operações diárias, mas também os algoritmos que as suportam. O número de clientes, bem como suas necessidades e exigências, está em constante crescimento, e o uso de algoritmos de otimização é um componente chave para prestação de um atendimento ao cliente eficaz. Além disso, Tan e Yeh (2021), enfatizaram que, uma vez que os problemas do mundo real envolvem restrições complexas, o uso de algoritmos avançados é necessário para solucionar o *VRP* em ambientes complicados e em constante mudança.

Considerando a Seção 2.2, é evidente que a pesquisa sobre o roteamento de veículos e problemas relacionados tem se expandido consideravelmente. É importante ressaltar que o *VRP* é um problema desafiador e que, para resolvê-lo, existem diferentes metodologias que têm sido exploradas. Dependendo da complexidade e do tamanho das instâncias, as técnicas de resolução podem ser classificadas em três categorias: métodos exatos, heurísticos e metaheurísticos (CHEN; SHEN; HONG, 2019). A seguir, serão descritas essas diferentes metodologias de solução.

2.3.1 Métodos Exatos

A área de roteirização de veículos tem experimentado uma evolução significativa ao longo dos anos, marcada pelo avanço na implementação de algoritmos exatos, conforme o destacado por Rodríguez-Martín, Salazar-González e Yaman (2019). Esses algoritmos foram desenvolvidos para solucionar o problema clássico de

roteirização de veículos, no qual uma instalação central é responsável por atender clientes com demandas conhecidas.

Por outro lado, De Bruecker *et al.* (2018) apresentaram as principais abordagens exatas utilizadas para solucionar as diferentes variações do *VRP*. Apesar da eficácia comprovada dos métodos exatos, eles enfrentam desafios quando aplicados a problemas de grande porte. Para solucionar o *VRP*, esses métodos utilizam a estratégia de dividir e conquistar, particionando o espaço da solução em subproblemas e aplicando otimizações individuais a cada um deles (JOURDAN *et al.*, 2009). Essa abordagem busca lidar com a complexidade computacional envolvida na busca pela melhor solução. No entanto, é importante ressaltar que, apesar das vantagens dos algoritmos exatos em termos de precisão, eles podem se tornar inviáveis em cenários com um grande número de clientes e veículos (DREXL., 2012).

2.3.2 Métodos Heurísticos

As heurísticas têm desempenhado um papel fundamental na resolução de diversas variantes de *VRP* e podem ser definidas como abordagens de resolução de problemas que se baseiam em estratégias práticas para encontrar soluções aproximadas ou satisfatórias em um tempo aceitável. Muitos desses métodos podem ser facilmente adaptados para levar em conta restrições práticas adicionais, embora isso possa afetar seu desempenho geral (ZHANG *et al.*, 2021).

Esses procedimentos oferecem soluções de qualidade aceitável por meio da exploração limitada do espaço de pesquisa (PISINGER; ROPKE, 2007). São especialmente úteis quando se lida com problemas complexos, em que encontrar soluções exatas não é viável ou quando os recursos disponíveis são limitados (TAN; YEH, 2021).

Contudo, é importante observar que, embora os métodos heurísticos possam fornecer soluções eficientes e rápidas, eles não garantem a melhor solução possível, uma vez que são aproximados. No entanto, eles se mostram valiosos ao trabalhar com problemas complexos e encontrar soluções práticas em várias situações do mundo real, conforme o descrito por Zhang *et al.* (2021).

2.3.3 Métodos Metaheurísticos

Conforme indicado por Gendreau *et al.* (2002), as metaheurísticas pertencem a uma classe de heurísticas avançadas que são empregadas na identificação de soluções ótimas, utilizando técnicas genéricas de solução que exploram todo o espaço de busca. Neumann e Witt (2013) afirmam que algoritmos meta-heurísticos representam uma solução prática para problemas de otimização NP-*hard*, projetados para alcançar soluções aproximadas ou ótimas de forma eficiente.

Segundo Dokeroglu *et al.* (2019), o termo metaheurística descreve heurísticas de alto nível capazes de resolver uma ampla gama de problemas de otimização. Recentemente, avanços tecnológicos têm permitido o sucesso desses algoritmos na resolução de problemas que antes eram considerados intratáveis. Essas técnicas têm sido adotadas por diversas áreas de pesquisa operacional, expandindo o escopo de aplicação dessas técnicas com o objetivo de encontrar soluções globais e eficientes (RAHMAN *et al.*, 2021; SABET; FAROOQ, 2022).

Dentre as diversas classificações, existem os algoritmos baseados em trajetória, que buscam encontrar uma solução ótima ao seguir uma única direção de exploração do espaço de busca (ALMEIDA; LIMA; CARVALHO, 2022). Por outro lado, outra classificação está baseada em população, categoria que tem ganhado popularidade recentemente para resolver problemas de otimização global em larga escala, de acordo com Omidvar, Li e Yao (2022). Tais algoritmos têm demonstrado habilidades na busca pelo ótimo global, variando de acordo com o esquema inicial (AGUSHAKA; EZUGWU, 2022).

Nesta seção, foram apresentados os conceitos dos métodos de solução exatos, heurísticos e meta-heurísticos. Na próxima seção, abordaremos trabalhos relacionados à roteirização na coleta de resíduos sólidos, com o objetivo de explorar diferentes abordagens para solucionar esse problema específico. Serão examinadas pesquisas e estudos relevantes que contribuíram para o avanço das técnicas aplicadas à gestão eficiente da coleta de resíduos, buscando encontrar soluções práticas e sustentáveis para esse desafio operacional.

2.4 Trabalhos relacionados as variantes do VRP para otimização da coleta de resíduos sólidos

Nesta seção, serão apresentados estudos da primeira revisão de literatura que abordam o roteamento de veículos para a coleta de resíduos, utilizando heurísticas e exatos como método de solução. O portfólio final inclui 21 variantes de VRP, as quais foram criadas ao longo do tempo, buscado abarcar os dados mais realistas possíveis.

No Quadro 1, é apresentado um resumo das variantes de VRP aplicadas na coleta de resíduos sólidos, conforme descritas pelos pesquisadores em seus artigos publicados. A primeira coluna do quadro indica o tipo de resíduo estudado, seguida pela segunda coluna, que descreve a variante de VRP aplicada. Na terceira coluna, encontra-se a descrição específica do VRP utilizado, e a quarta coluna contém informações sobre os autores e os anos de publicação dos artigos. Esse quadro oferecerá uma visão geral das diferentes abordagens adotadas na resolução desse problema específico, proporcionando uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias mais eficientes e sustentáveis na gestão da coleta de resíduos sólidos.

Quadro 1 – Tipos de VRP - portfólio final de artigos

Resíduo	Tipo de VRP	Descrição do VRP	Autores
Resíduos de saúde	<i>Periodic VRP</i> (PVRP)	Atende aos clientes em intervalos regulares ao longo do tempo, levando em conta suas demandas de acordo com o cronograma estabelecido.	Shih e Lin (1999), Shih e Chang (2001)
	<i>Periodic Load Dependent Capacitated VRP</i> (PLCVRP)	Trata-se de uma variante de PVRP que considerara a demanda variável dos clientes em um horizonte de tempo definido, contemplando a alocação e sequenciamento de visitas.	Taslimi, Batta e Kwon (2020)
	<i>Capacitated VRP</i> (CVRP)	Leva em conta a capacidade limitada de uma frota de veículos usada para atender a um conjunto de clientes.	Babaei Tirkolaee e Aydin (2021)
	<i>Healthcare Waste Collection VRP</i> (HWCVRP)	Envolve a necessidade de cumprir regulamentações e requisitos legais, bem como a exigência de procedimentos específicos que levem em consideração os aspectos ambientais e sociais relevantes.	Ghannadpour, Zandieh e Esmaeili (2021)
	<i>VRP with Simultaneous Pickup and Delivery</i> (VRSPD)	Este tipo é baseado no VRPPD, no qual ocorre a coleta e entrega eficiente e simultânea de mercadorias utilizando os mesmos veículos.	Sazvar <i>et al.</i> (2021)

Resí duo	Tipo de VRP	Descrição do VRP	Autores
	<i>Periodic VRP with Time Windows</i> (PVRPTW)	Essa é uma variação de <i>PVRP</i> que considera a demanda dos clientes em intervalos planejados dentro de janelas de tempo específicas.	Gao <i>et al.</i> (2021), Zhang <i>et al.</i> (2022)
	<i>Location VRP with Time Windows</i> (LRPTW)	Envolve a alocação e sequenciamento de entregas ou visitas, considerando janelas de tempo definidas em um período limitado específico.	Hassanpour <i>et al.</i> (2023)
Resíduos recicláveis	<i>VRP with Simultaneous Pickup and Delivery</i> (VRPSPD)	Essa é uma variante de <i>VRPPD</i> que envolve a coleta e entrega simultânea de itens pelos veículos.	Bianchessi e Righini (2007)
	<i>Periodic VRP with Intermediate Facilities</i> (PVRP-IF)	Varição de <i>PVRP</i> , que utiliza frotas com múltiplos depósitos e rotas intermediárias para atender à demanda dos clientes.	Hemmelmayr <i>et al.</i> (2011)
	<i>Classical VRP</i> (VRP)	Baseado em atender à demanda dos clientes considerando um depósito.	Yao <i>et al.</i> (2013), Bing <i>et al.</i> (2014) e Marseglia <i>et al.</i> (2022)
	<i>Multi-depot periodic VRP with inter-depot routes</i> (MDPVRPI)	É uma variação de <i>PVRP</i> que envolve frotas com múltiplos depósitos e rotas inter depósitos em um planejamento estratégico de longo prazo determinado.	Ramos, Gomes e Barbosa-Póvoa (2014)
	<i>VRP with Intermediate Facilities</i> (VRP-IF)	Visa atender à demanda de um conjunto de clientes distribuídos em locais específicos, levando em conta a presença de instalações intermediárias que podem servir como locais de transferência.	Markov, Varone e Bierlaire (2016)
	<i>Eco-efficient VRP</i> (Ee-VRP)	Adiciona o planejamento das rotas que serão percorridas pela frota, tendo em vista considerações ambientais e sustentáveis.	Expósito-Márquez <i>et al.</i> (2019)
	<i>Green Split Pick-up VRP</i> (GSPVRP)	É uma variante de <i>VRPPD</i> , na qual a demanda dos clientes é considerada para a coleta de mercadorias, além de utilizar uma instalação de recuperação baseada no conceito de cidade inteligente.	Salehi-Amiri <i>et al.</i> (2022)
Resíduos sólidos urbanos	<i>Classical VRP</i> (VRP)	Tem como base atender à demanda dos clientes considerando apenas um único depósito e não limita a capacidade dos veículos.	Chang e Wei (2002), Mora <i>et al.</i> (2014), Son (2014), Amal <i>et al.</i> (2018), Aliahmadi <i>et al.</i> (2019), Akbarpour <i>et al.</i> (2021) e Burduk <i>et al.</i> (2022)
	<i>VRP with Time Windows</i> (VRPTW)	Visa atender a demanda variável de clientes em intervalos regulares de tempo, considerando janelas específicas para cada cliente.	Benjamin e Beasley (2010), Benjamin e Beasley (2012)

Resíduo	Tipo de VRP	Descrição do VRP	Autores
	<i>VRP multi-depot</i> (MDVRP)	Essa variação envolve frotas com múltiplos depósitos e centros de distribuição a partir dos quais os veículos iniciam suas rotas.	Geetha, Vanathi e Poonthalir (2012)
	<i>Roll On-Roll Off VRP</i> (RRVRP)	É caracterizada pela utilização de grandes contêineres para acumular elevadas quantidades de resíduos.	Hauge <i>et al.</i> (2014) e Li <i>et al.</i> (2017)
	<i>Periodic VRP</i> (PVRP)	Trata-se de uma variante que atende aos clientes em intervalos regulares ao longo do tempo, levando em conta suas demandas pontuais.	Miranda <i>et al.</i> (2015), Bruecker <i>et al.</i> (2018), Gläser e Stücken (2021), Van Engeland e Beliën (2021), Mahdavi, Mansour e Sajadieh (2022)
	<i>Capacitated VRP</i> (CVRP)	É uma variação considera a capacidade limitada de uma frota de veículos para atender a um conjunto de clientes específicos através de um prévio planejamento.	Abbatecola <i>et al.</i> (2016), Wei <i>et al.</i> (2019), Qiao <i>et al.</i> (2020), Tomitagawa <i>et al.</i> (2022), Dereci e Karabekmez (2022) e Rahmanifar <i>et al.</i> (2023)
	<i>Asymmetric Capacitated VRP</i> (ACVRP)	Considerada uma vertente do VRP que envolve frotas com capacidades distintas e rotas assimétricas.	López-Sánchez <i>et al.</i> (2017)
	<i>Multi-Trip VRP with Time Windows and Unloading Queue at Depot</i> (MTVRPTW-UQD)	Vertente do VRPTW que permite várias viagens do veículo dentro do tempo planejado.	Huang <i>et al.</i> (2021)
	<i>Waste Collection VRP</i> (WCVRP)	Considerada uma variação de CVRP que se concentra na coleta e transporte eficiente de resíduos sólidos de um ou mais pontos de coleta para instalações de processamento ou descarte final.	Aliahmadi, Barzinpour e Pishvaei (2021)
	<i>Multidepot Multidisposal-Facility Multitrip VRP</i> (M3CVRP)	Considerada uma variação de CVRP, que envolve frotas com múltiplos depósitos, diversas instalações de destinação e rotas multiples.	Lan <i>et al.</i> (2022)

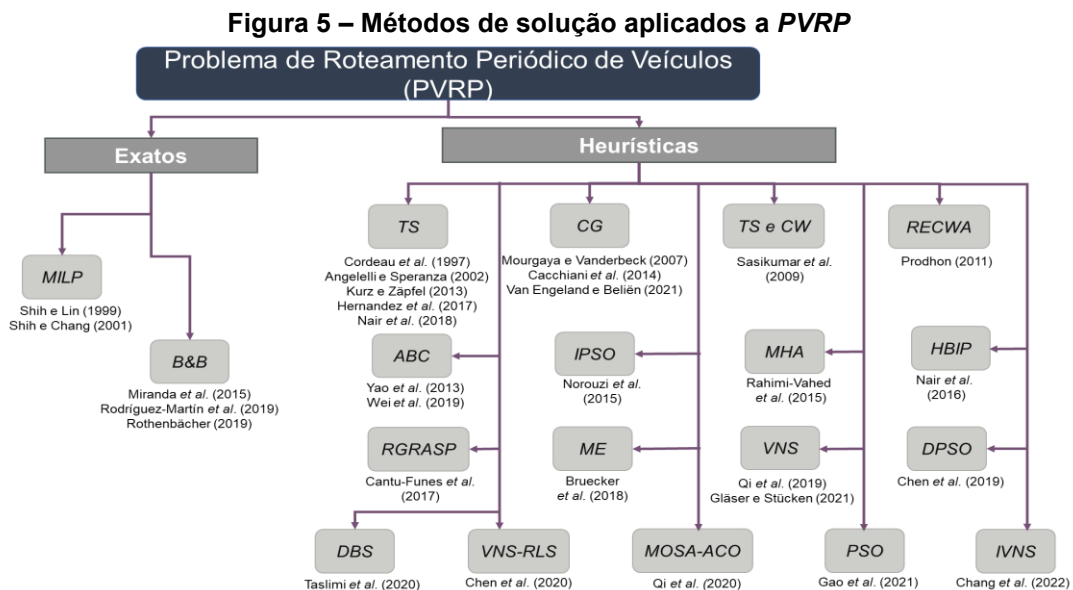
Fonte: Autoria própria (2023)

Nesta seção, foram apresentadas as variantes do VRP que se concentram na coleta de resíduos e aplicam exatas e heurísticas como métodos de solução. Cada uma dessas variantes possui características específicas desenvolvidas ao longo dos anos, com a finalidade de tornar os estudos de caso mais realistas.

A próxima seção apresentará estudos relacionados tanto aos métodos de solução exatos quanto às heurísticas específicas aplicadas ao Problema de Roteamento Periódico de Veículos (*PVRP* em inglês). Essa escolha foi baseada na revisão da literatura existente, que identificou o *PVRP* como a variante mais adequada para o problema de coleta de resíduos de saúde, pois leva em consideração a frequência de visitas em função da demanda dos clientes, o que será mais bem desenvolvido na Etapa 1 da metodologia. Essa abordagem tem o objetivo de proporcionar uma análise aprofundada e uma solução eficiente para o desafiador problema de coleta de resíduos de saúde, contribuindo para uma gestão mais sustentável e eficaz desses serviços essenciais.

2.5 Trabalhos relacionados das abordagens exatos e heurísticos para o Problema de Roteamento Periódico de Veículos (*PVRP*)

Nesta seção, serão apresentados os estudos encontrados na segunda revisão de literatura sobre o *PVRP*, uma variante caracterizada por sua natureza periódica no tempo, explorando métodos exatos e heurísticos que foram utilizados para abordar esse problema. O objetivo desta análise é identificar a abordagem de solução mais adequada para resolver o problema em estudo, levando em consideração os parâmetros e restrições específicas envolvidas. A Figura 5 apresenta um resumo de todos os algoritmos encontrados no portfólio final, fornecendo uma visão geral das diferentes estratégias utilizadas para enfrentar esse desafio de *PVRP*.



Fonte: Autoria Própria (2023)

Os Quadros 2 e 3 apresentam informações relevantes, incluindo os algoritmos e suas respectivas siglas, bem como os autores e o ano de publicação dos artigos. Esse quadro permitirá uma avaliação criteriosa das abordagens adotadas por cada estudo, auxiliando na identificação das estratégias mais promissoras para serem investigadas e aprimoradas na etapa 2 da metodologia desta pesquisa sobre coleta de resíduos de saúde.

Quadro 2 – Métodos de soluções exatos aplicados ao PVRP

Algoritmo utilizado		Autores
<i>Mixed Integer Linear Programming</i>	<i>MILP</i>	Shih e Lin (1999), Shih e Chang (2001)
<i>Branch and bound</i>	<i>B&B</i>	Miranda <i>et al.</i> (2015), Rodríguez-Martín, Salazar-González e Yaman (2019), Rothenbächer (2019)

Fonte: Autoria própria (2023)

No que diz respeito aos métodos exatos de solução aplicados ao PVRP encontrados na literatura, destacam-se cinco estudos que apresentam dois algoritmos diferentes. Três desses estudos utilizaram a técnica *Branch and Bound (B&B)*, enquanto os outros dois aplicaram a abordagem de *Mixed Integer Linear Programming (MILP)*. O objetivo desses estudos variou, buscando desde a minimização dos custos totais até a redução da diferença das viagens diárias máximas e o custo total de resíduos infecciosos.

Por outro lado, foram encontrados 25 estudos que abordaram heurísticas como método de solução, totalizando 17 algoritmos utilizados para resolver o PVRP. A seguir, se apresenta o Quadro 3, com os algoritmos encontrados na literatura que foram utilizadas pelos pesquisadores.

Quadro 3 – Métodos de soluções heurísticas aplicados ao PVRP

Algoritmo utilizado		Autores
<i>Tabu Search</i>	<i>TS</i>	Cordeau, Gendreau e Laporte (1997), Angelelli e Speranza (2002), Kurz e Zäpfel (2013), Hernandez, Gendreau e Potvin (2017) e Nair <i>et al.</i> (2018)
<i>Column Generation</i>	<i>CG</i>	Mourgaya e Vanderbeck (2007), Cacchiani, Hemmelmayr e Fabien Tricoire (2014) e Van Engeland e Beliën (2021)
<i>Tabu Search, Sweep algorithm, Clarke-Wright</i>	<i>TS-SA-CW</i>	Sasikumar, Kannan e Haq (2009)

Algoritmo utilizado		Autores
<i>Randomized Extended Clarke and Wright Algorithm</i>	<i>RECWA</i>	Prodhon (2011)
<i>Artificial Bee Colony</i>	<i>ABC</i>	Yao <i>et al.</i> (2013), Wei <i>et al.</i> (2019)
<i>Improved Particle Swarm Optimization</i>	<i>IPSO</i>	Norouzi, Sadegh-Amalnick e Alinaghiyan (2015)
<i>Modular Heuristic Algorithm</i>	<i>MHA</i>	Rahimi-Vahed <i>et al.</i> (2015)
<i>Heuristics Based on Integer Programming</i>	<i>HBIP</i>	Nair <i>et al.</i> (2016)
<i>Reactive Gainful Randomized Adaptive Search Procedure</i>	<i>RGRASP</i>	Cantu-Funes, Salazar-Aguilar e Boyer (2017)
<i>Model Enhancement Technique</i>	<i>ME</i>	Bruecker <i>et al.</i> (2018)
<i>Variable Neighborhood Search</i>	<i>VNS</i>	Qi <i>et al.</i> (2019), Gläser e Stücken (2021)
<i>Discrete Particle Swarm Optimization</i>	<i>DPSO</i>	Chen, Shen e Hong (2019)
<i>Variable Neighborhood Search - Reinforcement Learning (VNS-RLS)</i>	<i>VNS-RLS</i>	Chen <i>et al.</i> (2020)
<i>Multi Objective Simulate Annealing - Ant Colony Optimization (MOSA-ACO)</i>	<i>MOSA-ACO</i>	Wang <i>et al.</i> (2020)
<i>Decomposition Based Heuristic</i>	<i>DBH</i>	Taslimi, Batta e Kwon (2020)
<i>Particle Swarm Optimisation</i>	<i>PSO</i>	Gao <i>et al.</i> (2021)
<i>Improved Variable Neighborhood Search</i>	<i>IVNS</i>	Zhang <i>et al.</i> (2022)

Fonte: Autoria própria (2023)

Entre os estudos que utilizaram algoritmos heurísticos para resolver os estudos de caso, foram encontrados diversos objetivos, como a minimização dos custos, das distâncias percorridas e do tempo do processo. Além disso, as características próprias do problema, como a quantidade de depósitos, veículos, e análise do ponto de vista econômico e ambiental, foram consideradas em cada algoritmo planejado. Cabe ressaltar que também foram observadas combinações de dois algoritmos para resolver um estudo de caso, visando obter resultados mais precisos e trabalhar de forma mais realista com os dados.

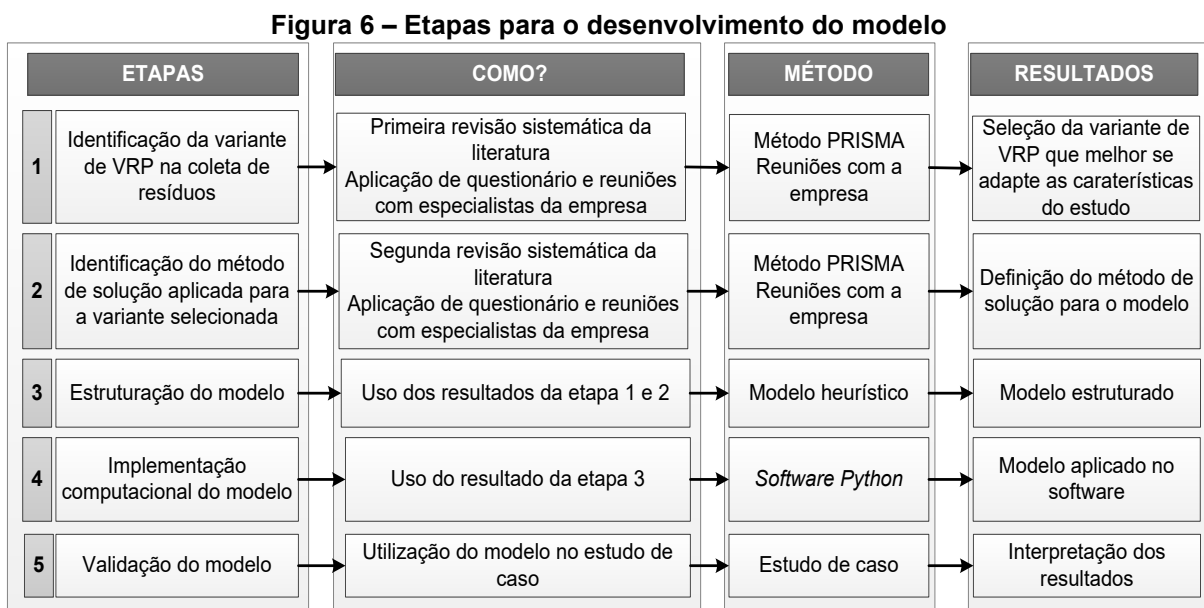
Com os dados apresentados tanto dos algoritmos exatos como dos heurísticos aplicados à variante *PVRP*, podemos observar uma a variedade de abordagens para a resolução desse problema, indicando sua relevância e aplicabilidade em cenários do mundo real. Essa diversidade de algoritmos demonstra

a busca contínua por soluções eficientes e adaptáveis, capazes de lidar com os desafios específicos enfrentados no roteamento periódico de veículos.

Na seção seguinte, serão apresentados os passos utilizados na metodologia para dar cumprimento ao objetivo proposto. Essa metodologia permitirá aprofundar nossa investigação sobre a coleta de resíduos de saúde, com foco no *PVRP*, e desenvolver uma abordagem eficaz e inovadora para a gestão sustentável e eficiente desse serviço essencial.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo são descritas as informações necessárias para atingir os objetivos propostos neste trabalho. O capítulo está subdividido nas seguintes etapas: identificação da variante de problema de roteamento aplicadas na coleta de resíduos, identificação dos métodos de solução do problema da variante de *VRP* selecionada, estruturação do modelo, implementação computacional do modelo e, por fim, sua validação. Cada uma dessas etapas está representada na Figura 6.



Fonte: Autoria própria (2023)

3.1 Etapa 1: Identificação da variante de *VRP* na coleta de resíduos

3.1.1 Primeira revisão da literatura

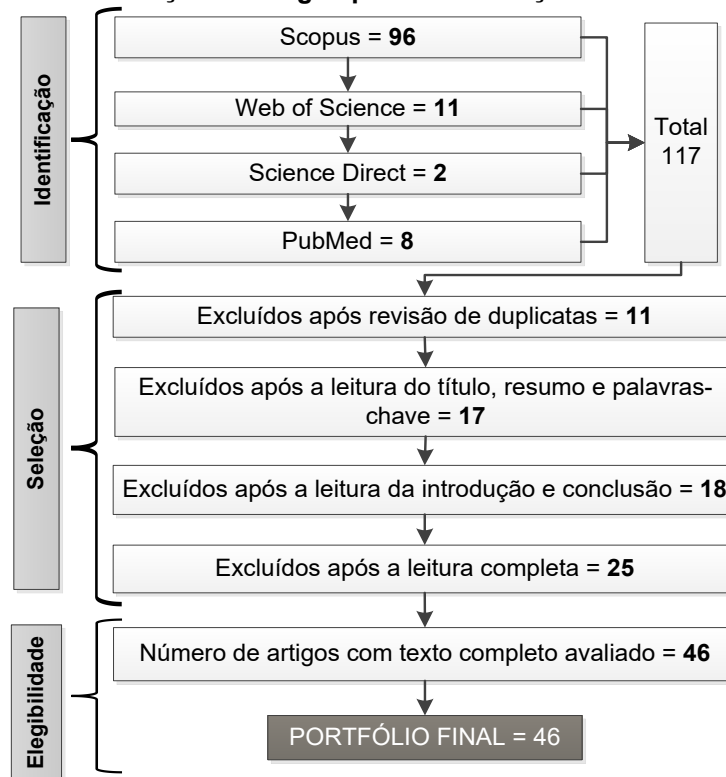
A fim de identificar a variante mais apropriada para o problema de roteamento de veículos em questão, foi conduzida uma primeira revisão sistemática de literatura, para identificar e analisar o estado da arte dos estudos sobre roteamento de veículos aplicados ao processo de coleta de resíduos sólidos em geral (resíduos urbanos, médicos, industriais, entre outros), abordados por métodos exatos e heurísticos como métodos de solução. Essa revisão seguiu o método *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis* (PRISMA) (PAGE *et al.*, 2021), e as buscas foram iniciadas em novembro de 2022 e atualizadas em março de 2023.

Para iniciar esta etapa, foram estabelecidas as palavras-chave para a pesquisa inicial, que incluíram: (“*solid waste*”, “*waste collection*”, “*waste*

management”), (*exact algorithm*”, *heuristics algorithm*”), (*vehicle routing problem*”, *VRP*”). Além disso, as bases de dados utilizadas para a busca dos trabalhos publicados foram *Scopus*, *Web of Science (WoS)*, *Science Direct (SD)* e *PubMed (PM)*, sem considerar restrições temporais.

De acordo com os critérios estabelecidos pelo método PRISMA, é necessário seguir uma série de etapas para identificar, selecionar e avaliar as pesquisas relevantes a serem incluídas nesta revisão. A Figura 7 oferece uma visão geral do processo de seleção dos artigos utilizados nesta seção.

Figura 7 – Processo de seleção de artigos para identificação da variante de VRP



Fonte: Autoria própria (2023)

Para realizar a filtragem inicial, conforme ilustrado na Figura 7, identificaram-se 117 artigos, dos quais 11 foram excluídos por serem trabalhos duplicados. Em seguida, a leitura dos títulos, resumos e palavras-chaves possibilitou a exclusão de mais 17 trabalhos. A etapa subsequente envolveu a leitura da introdução e conclusão, resultando na eliminação de mais 18 artigos. Por fim, foram realizadas leituras completas de 71 artigos, dos quais 25 foram excluídos por não se enquadrarem no escopo da pesquisa. Isso resultou em um portfólio final de 46 artigos.

Todos os artigos foram gerenciados utilizando os softwares *Mendeley Desktop* e *JabRef*. (Versão 3.8.2) para exportar os dados para uma planilha no software *Excel*. Essa abordagem permitiu a tabulação das publicações selecionadas.

Este estudo elucida os componentes chave do portfólio final, os quais examinam as diferentes variantes do *VRP* aplicadas no contexto da coleta de resíduos sólidos. Essas abordagens são analisadas e apresentadas na Seção 2.4 do presente trabalho. Na próxima subseção, será apresentada a variante específica de roteamento de veículos que foi selecionada para o desenvolvimento deste estudo, considerando as características que mais se harmonizam com a problemática deste trabalho.

3.1.2 Variante do Problema de Roteamento de Veículos selecionado

Para estruturar o modelo, foi necessário identificar a variante do *VRP* que melhor se adequasse às características do problema abordado nesta pesquisa, que trata da coleta de resíduos de saúde. Essas informações foram obtidas por meio de uma revisão do estado da arte, como mencionado anteriormente. Além disso, a fim de compreender a situação atual da empresa e as características necessárias para a coleta eficiente destes resíduos, foram conduzidas entrevistas com especialistas da empresa em estudo. Adicionalmente, foi empregado um questionário para aprofundar a pesquisa, cujo formulário de diagnóstico encaminhado à empresa está disponível no Apêndice A.

Ao analisar o portfólio final da revisão de literatura, constatou-se que os estudos se concentram na coleta de três tipos de resíduos. Dentre eles, 28 estudos abordaram a coleta de resíduos urbanos, enquanto 9 estudos se dedicaram aos resíduos recicláveis e outros 9 estudos abordaram os resíduos de saúde. Esses estudos levaram em consideração as restrições operacionais, sendo resolvidos por meio de métodos exatos, heurísticos ou metaheurísticos. Além disso, com base nos dados fornecidos pela empresa em questão e levando em consideração que o modelo será aplicado ao processo de coleta de resíduos de saúde, observou-se que, no caso específico desses resíduos, é necessário atender a certas exigências, como a natureza da coleta, as restrições operacionais, a eficiência, segurança do pessoal e a flexibilidade de coleta.

Considerando essas particularidades do processo de coleta dos resíduos de saúde, foi determinado que a variante do *VRP* que melhor se adequa com a necessidade de roteirização de veículos é o *Periodic Vehicle Routing Problem*

(*PVRP*). Esta variante apresenta uma abordagem adequada para atender os requisitos dos problemas de coleta dentro de um período de planejamento definido, levando em consideração a demanda dos clientes em uma frequência determinada (BELTRAMI; BODIN, 1974).

Com base nas informações apresentadas, pode-se afirmar que o *PVRP* é uma abordagem eficiente para a gestão da coleta de resíduos de saúde. Essa coleta geralmente ocorre seguindo um cronograma predefinido e considerando restrições de um horizonte de tempo (GAO *et al.*, 2021). Além de ser especialmente adequada para lidar com os prazos ou horários de coleta (ZHANG *et al.*, 2022), uma vez que o objetivo do planejamento é garantir a qualidade da coleta dos resíduos que visam garantir a segurança e proteção da saúde pública e do meio ambiente, dada a natureza dos resíduos coletados.

Na subseção seguinte, serão abordada a Etapa 2 da metodologia, que envolve a identificação dos métodos de solução aplicáveis à variante selecionada, no caso o *PVRP*.

3.2 Etapa 2: Identificação do método de solução aplicada para a variante selecionada

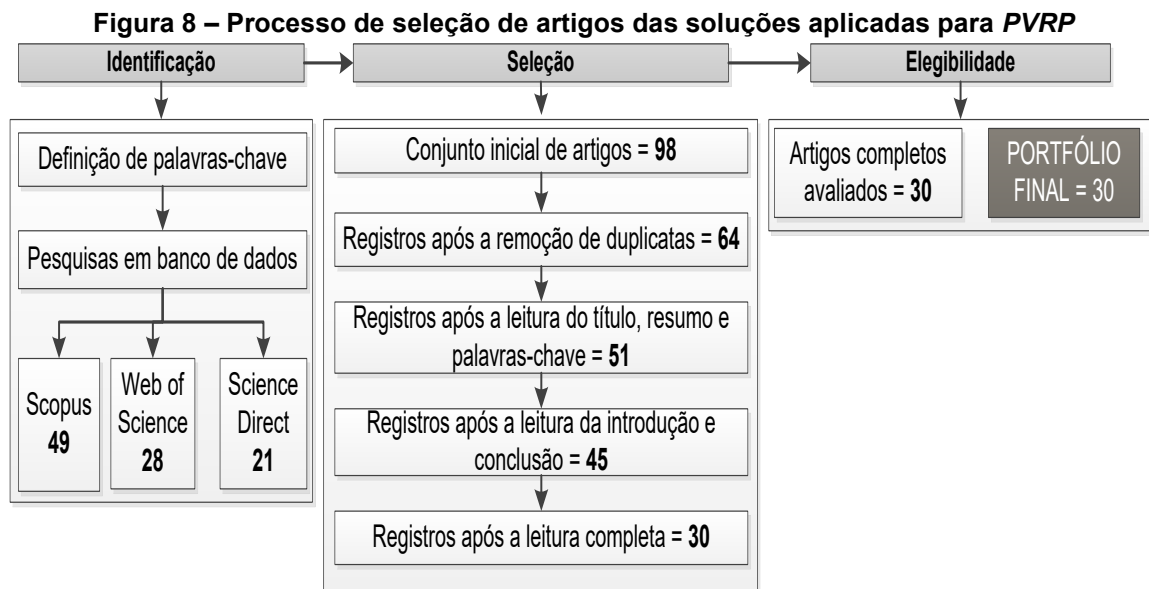
3.2.1 Segunda revisão da literatura

Após identificar o *PVRP* como a variante mais adequada para a pesquisa, foram definidos os métodos de solução que melhor se adaptassem para a resolução do modelo. Para isso, realizou-se uma segunda revisão sistemática da literatura, complementando a primeira revisão, com o objetivo de buscar estudos que aplicaram o *PVRP* em diferentes áreas de aplicação, como serviço de delivery, transporte escolar, coleta de resíduos, entre outros. Tal abordagem se revelou essencial para evitar a perda de informações relevantes, proporcionando uma visão global das pesquisas que empregaram tanto soluções exatas quanto heurísticas para enfrentar o *PVRP*, independentemente do contexto específico de coleta ou entrega de produtos.

A escolha da estratégia de solução mais adequada depende da natureza específica do problema em questão, da qualidade da solução necessária e da eficiência computacional desejada (NI; TANG, 2023). Nesse sentido, é fundamental considerar diversos fatores para selecionar o método mais apropriado, levando em conta a complexidade do *PVRP* e os objetivos do estudo em questão.

Esta revisão seguiu as diretrizes atualizadas do *PRISMA* e foi conduzida no período de dezembro de 2022. Além disso, considera pesquisas adicionais até março de 2023 para completar os resultados obtidos. Para realizar o levantamento científico, selecionamos três bases de dados: *Scopus*, *Web of Science (WoS)* e *Science Direct (SD)*. Utilizando operadores booleanos para a busca das palavras-chaves, e as queries foram: ("*periodic vehicle routing problem*" OR "*PVRP*") AND ("*exact*" OR "*heuristics*"). Essa mesma combinação foi utilizada nas três bases de dados, seguindo os critérios específicos de cada uma delas, sem restrições de limite temporal para a busca de trabalhos.

A Figura 8 apresenta uma visão geral do processo de seleção dos artigos para esta subseção.



Fonte: Autoria própria (2023)

Considerando os critérios estabelecidos para este estudo, foram identificados inicialmente 98 artigos, dos quais 34 duplicatas foram excluídas. Após a revisão dos títulos e resumos, 51 estudos foram selecionados relevantes para o processo de leitura da introdução e conclusões. Nesta fase, 6 artigos foram excluídos por não atenderem aos critérios específicos estabelecidos para o tema em estudo. Como resultado, 45 artigos foram selecionados para uma leitura completa dos documentos, a fim de verificar se eles estavam alinhados com o objetivo desta pesquisa. No final, um portfólio final de 30 artigos foi selecionado, de acordo com os critérios de elegibilidade estabelecidos.

Com base na análise dos estudos, constatou-se que os algoritmos exatos são fundamentados em modelos matemáticos rigorosos e podem fornecer soluções verificáveis. De acordo com Miranda *et al.* (2015), para problemas de *PVRP* em pequena escala, esses algoritmos podem encontrar a solução ótima. No entanto, à medida que o processo de solução se torna mais complexo e o problema aumento de escala, eles podem se tornar impraticáveis devido à complexidade computacional ou tempo de execução (ROTHENBÄCHER, 2019). Portanto, de acordo com o estudo de Pasha *et al.* (2022), a solução ótima só pode ser obtida quando o número de clientes é pequeno e a rede de transporte é simples.

Em contraste com os algoritmos exatos, os algoritmos heurísticos fornecem uma solução aceitável e viável para problemas de otimização combinatória em uma faixa aceitável de tempo. Embora não forneçam a solução ótima, eles são capazes de resolver problemas de *PVRP* em grande escala (PISINGER; ROPKE, 2007) e (CHEN, SHEN E HONG, 2019). Portanto, o uso de algoritmos heurísticos permite resolver modelos e obter soluções quase ótimas de forma eficiente e em um tempo razoável (GAO *et al.*, 2022).

Os estudos selecionados para integrar o portfólio final, focalizados nos métodos de solução, são apresentados na Seção 2.5 deste estudo, com o propósito de compreender a estrutura e eficácia de cada algoritmo utilizado pelos autores dentro do contexto do *PVRP*. Na próxima subseção, será apresentado o método de solução escolhido para resolver o modelo proposto, levando em consideração as características específicas do problema e a revisão da literatura.

3.2.2 Definição do método de solução para o modelo proposto

Após realizar uma análise dos métodos para resolver o *PVRP*, constata-se que as heurísticas se destacam como uma abordagem mais viável para encontrar soluções de alta qualidade em um tempo razoável. Eles demonstram habilidade para lidar com grandes instâncias do problema, além de apresentarem flexibilidade necessária para serem ajustadas de acordo com as necessidades específicas, tornando-as soluções adequadas para situações reais.

Como estratégia para resolver o problema em questão, optou-se pela utilização de dois algoritmos baseados em heurísticas: *Clarke and Wright (CW)* e *Particle Swarm Optimization (PSO)*. Essa escolha foi fundamentada em três motivos principais. Em primer lugar, de acordo com Pisinger e Ropke (2007), ambas

heurísticas se complementam, visto que o algoritmo *CW* pode ser utilizado para gerar soluções iniciais de alta qualidade, que podem ser comparadas posteriormente pelo *PSO*, resultando em soluções ainda mais aprimoradas. Em segundo lugar, ambas as técnicas são eficientes do ponto de vista computacional o que permite a resolução de *PVRP* em grande escala dentro de um tempo razoável. Por fim, a robustez dos dois algoritmos possibilita sua aplicação em diversos problemas de roteamento, independentemente do tamanho, complexidade ou tipo de produto coletado, conforme mencionado por Pichpibul e Kawtummachai (2012).

Neste estudo, foi realizada uma análise comparativa entre os dois algoritmos, visando discernir a eficácia individual de cada um, bem como outras particularidades que caracterizam o seu desempenho. Ao analisar a literatura apresentada na Seção 3.2.1, percebe-se que os algoritmos *CW* e *PSO* não foram diretamente comparados um com outro. Contudo, diversos estudos investigam a aplicação isolada desses algoritmos, assim como sua combinação com outras abordagens para resolver o *PVRP*. Embora não haja uma comparação direta dos algoritmos *CW* e *PSO* no contexto específico do estudo de roteamento de veículos periódico, a literatura oferece *insights* significativos acerca do desempenho e da eficácia de cada algoritmo individualmente.

Nesse contexto, Sasikumar, Kannan e Haq (2009) utilizaram o algoritmo *CW* em conjunto com outros algoritmos de construção, com o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos veículos. Por outro lado, Chen *et al.* (2019) e Gao *et al.* (2021) empregaram o algoritmo *PSO* para reduzir as distâncias de coleta em um tempo razoável, realizando testes em diferentes escalas e com números ótimos de veículos.

Esses estudos serviram como referência para fundamentar o uso dos algoritmos *CW* e *PSO* no modelo estruturado neste estudo, fornecendo evidências de sua eficácia e capacidade para encontrar soluções de alta qualidade em problemas relacionados ao *PVRP*. Além disso, a ausência de uma comparação direta destaca a originalidade e a contribuição do presente estudo, ao aplicar e comparar os algoritmos *CW* e *PSO* de forma específica para a empresa em análise. Os resultados obtidos fornecem uma perspectiva única sobre a eficiência e a capacidade desses algoritmos na otimização do roteamento de veículos periódico considerando a frequência de visitas aos clientes e a redução das distâncias, gerando *insights* valiosos para aprimorar as operações da empresa.

Na etapa subsequente, será apresentada a estruturação do problema, considerando tanto os dados obtidos na literatura quanto os dados fornecidos pela empresa no estudo de caso.

3.3 Etapa 3: Estruturação do modelo

Nesta seção, será apresentada a descrição do problema, definição dos parâmetros, restrições, formulação matemática, bem como a estruturação dos algoritmos heurísticos de solução *CW* e *PSO* considerando que o problema em questão é um *PVRP*.

3.3.1 Descrição do Problema

Com base nos dados fornecidos pela empresa, por meio de entrevistas com especialistas e de um diagnóstico inicial realizado através de um questionário, foram abordadas as principais características da variante *PVRP* na rede urbana onde ocorre a coleta desses resíduos de saúde. O questionário de diagnóstico aplicado à empresa encontra-se apresentado no Apêndice A.

A empresa realiza a classificação de seus clientes em dois grupos distintos: grandes e pequenos, com base na quantidade de resíduos coletados. Os clientes classificados como grandes compreendem instituições como hospitais, clínicas e condomínios. Já os clientes pequenos incluem estabelecimento como consultórios médicos, laboratórios, consultórios odontológicos, ginecológicos, ópticas e farmácias.

Além disso, para efetuar a atividade de coleta, são empregados dois veículos exclusivamente designados para essa finalidade. Esses veículos partem de um depósito e seguem uma rota preestabelecida, visitando os clientes designados para recolher os resíduos durante o período de planejamento, durante o expediente de trabalho.

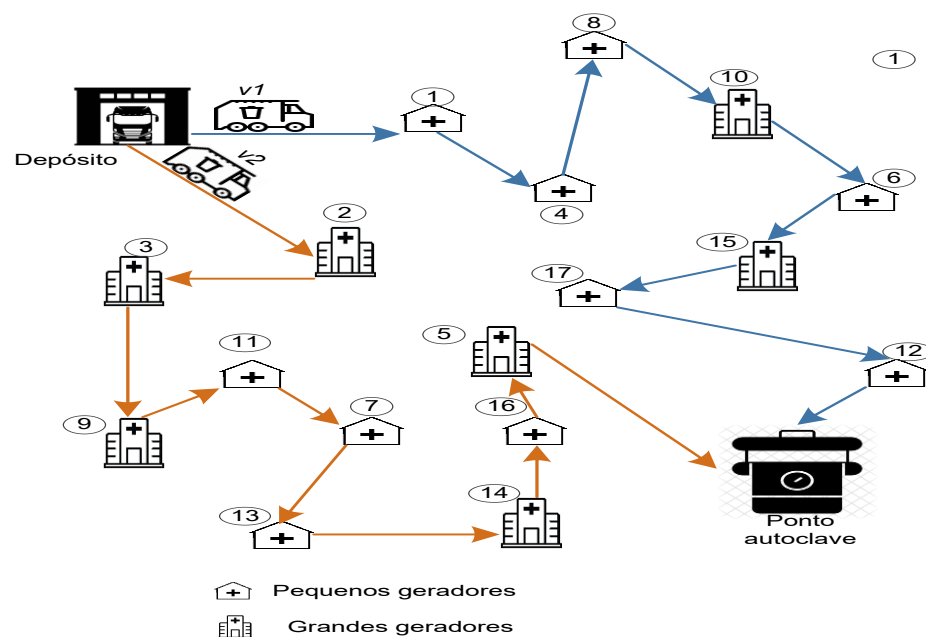
Após a conclusão da coleta, os veículos direcionam-se à autoclave, onde os resíduos são adequadamente depositados. Nesse local, os materiais contaminados entram em contacto com vapor de água sob pressão e em temperatura elevada, durante um período suficiente para eliminar todos os microrganismos presentes. Esse procedimento assegura a completa descontaminação dos resíduos, atendendo as normas de segurança e saúde. Posteriormente, os veículos retornam ao depósito

vazios, para que sejam devidamente lavados e desinfetados, garantindo a higienização necessária antes de dar continuidade à coleta no dia seguinte.

Considerando que a característica principal do *PVRP* é contar com um período de planejamento, foi estabelecido um período de cinco dias, correspondente à semana de trabalho (segunda a sexta-feira). A programação das visitas regulares torna-se mais eficiente, facilitando a coordenação das operações de coleta junto aos clientes. Para fins da pesquisa, os dias em que cada ponto deve ser atendido ao longo desse período foram previamente definidos.

É importante destacar que a capacidade dos veículos não pode ser ultrapassada, e a quantidade de veículos disponíveis é conhecida. Com base nesse processo descrito, a rede de transporte para a coleta de resíduos de saúde é apresentada na Figura 9.

Figura 9 - Processo de coleta dos resíduos



Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme pode ser observado na Figura 9, o modelo proposto tem como objetivo determinar as melhores combinações possíveis de visitas aos clientes, levando em consideração o tipo de cliente (grande ou pequeno), os dias de visita de cada veículo de acordo com sua capacidade, e estabelecendo rotas diárias ao longo do período de coleta, visando minimizar a distância percorrida.

Esse processo está diretamente vinculado ao número de veículos disponíveis e à frequência de visitas aos clientes para a coleta dos resíduos. Além disso, com base no planejamento do problema e nas revisões e pesquisas realizadas na seção 3.2.2, foram definidos os algoritmos *CW* e *PSO* baseados em heurísticas como métodos de solução para o modelo proposto de *PVRP*. Na subseção seguinte, são apresentadas as definições dos parâmetros e restrições utilizadas para a formulação do modelo.

3.3.2 Definição dos parâmetros e restrições

Este passo consiste na identificação dos parâmetros e restrições para estruturar o modelo. Esses elementos foram estabelecidos com base no levantamento do estado da arte realizado na seção 3.2.2, por meio da revisão da literatura sobre a variante *PVRP*, levando também em consideração os dados fornecidos pela empresa.

Nesse sentido, os dados dos parâmetros e restrições principais do portfólio final são apresentados nos Quadros 4 e 5. Nas primeiras colunas são apresentados os autores e o ano de publicação de cada artigo. Em seguida, são apresentados os principais parâmetros e restrições utilizados nos estudos analisados. Essas tabelas fornecem uma visão geral, destacando as características importantes consideradas em cada um dos estudos.

Quadro 4 – Parâmetros utilizados no *PVRP* - portfólio final de artigos

Autores	Clien tes	Coorde nadas de clientes	Demanda	Depó sito	Veícu los	Capacidade do veículo	Tempo médio
Cordeau, Gendreau e Laporte (1997)	x	x			x		
Shih e Lin (1999)	x	x	x				
Shih e Chang (2001)	x	x					
Angelelli e Speranza (2002)	x	x	x	x		x	
Mourgaya e Vanderbeck (2007)	x	x	x		x		
Sasikumar, Kannan e Haq (2009)	x	x	x	x	x	x	
Prodhon (2011)	x	x		x	x	x	
Yao <i>et al.</i> (2013)	x	x	x	x	x		
Kurz e Zäpfel (2013)	x	x	x	x	x	x	
Cacchiani, Hemmelmayr e Fabien Tricoire (2014)	x	x			x	x	

Autores	Clien tes	Coorde nadas de clientes	Demanda	Depó sito	Veícu los	Capacidade do veículo	Tempo médio
Miranda <i>et al.</i> (2015)	x	x				x	
Norouzi, Sadegh-Amalnick e Alinaghiyan (2015)	x	x			x		x
Rahimi-Vahed <i>et al.</i> (2015)	x	x				x	x
Nair <i>et al.</i> (2016)	x	x		x	x	x	
Hernandez, Gendreau e Potvin (2017)	x	x	x		x	x	x
Cantu-Funes, Salazar-Aguilar e Boyer (2017)	x	x		x			
Nair <i>et al.</i> (2018)	x	x	x			x	
Bruecker <i>et al.</i> (2018)	x	x			x		
Rodríguez-Martín, Salazar-González e Yaman (2019)	x	x			x	x	
Wei <i>et al.</i> (2019)	x	x			x	x	
Rothenbacher (2019)	x	x	x		x		x
Qi <i>et al.</i> (2019)	x	x	x		x		x
Chen, Shen e Hong (2019)	x	x	x	x	x	x	
Chen <i>et al.</i> (2020)	x	x	x	x	x		x
Wang <i>et al.</i> (2020)	x	x			x	x	x
Taslimi, Batta e Kwon (2020)	x	x		x	x	x	
Gläser e Stücken (2021)	x	x	x	x	x	x	
Van Engeland e Beliën (2021)	x	x	x		x		x
Gao <i>et al.</i> (2021)	x	x			x	x	
Zhang <i>et al.</i> (2022)	x	x	x		x	x	x

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo com o Quadro 4, pode-se observar que existem quatro parâmetros frequentemente utilizados pelos autores na formulação de modelos matemáticos para casos de *PVRP*. Esses parâmetros incluem o número de clientes, que são os nós do problema. Outro parâmetro relevante é a utilização das coordenadas geográficas dos clientes, a fim de determinar suas localizações exatas. Além disso, é importante conhecer a quantidade de veículos disponíveis para realizar a coleta dos resíduos, bem como a capacidade desses veículos, a fim de evitar sobrecarga durante a coleta.

Vale ressaltar que os parâmetros relacionados à demanda dos clientes, quantidade de depósitos e tempo médio de coleta não foram encontrados em todos

os estudos revisados, mas apenas em alguns que abordam a combinação da variante *PVRP* com outras variantes.

No Quadro 5, são apresentadas as restrições mais relevantes encontradas na literatura, que foram consideradas ao estruturar o modelo, juntamente com as características específicas da empresa.

Quadro 5 – Restrições utilizadas no *PVRP* - portfólio final de artigos

Autores	Horizonte de planejamento	Limite de capacidade dos veículos	Todos os veículos saem e voltam ao depósito	Garantem a visita uma vez a cada cliente	Limite de período de trabalho
Cordeau, Gendreau e Laporte (1997)	x	x	x	x	
Shih e Lin (1999)	x	x		x	x
Shih e Chang (2001)	x			x	x
Angelelli e Speranza (2002)	x	x		x	x
Mourgaya e Vanderbeck (2007)	x		x	x	x
Sasikumar, Kannan e Haq (2009)	x	x		x	x
Prodhon (2011)	x	x	x	x	x
Yao <i>et al.</i> (2013)	x	x	x	x	x
Kurz e Zäpfel (2013)	x	x	x	x	
Cacchiani, Hemmelmayr e Fabien Tricoire (2014)	x	x	x	x	x
Miranda <i>et al.</i> (2015)	x	x	x	x	x
Norouzi, Sadegh-Amalnick e Alinaghyan (2015)	x	x		x	x
Rahimi-Vahed <i>et al.</i> (2015)	x	x		x	x
Nair <i>et al.</i> (2016)	x	x	x	x	x
Hernandez, Gendreau e Potvin (2017)	x	x	x	x	
Cantu-Funes, Salazar-Aguilar e Boyer (2017)	x	x	x	x	x
Nair <i>et al.</i> (2018)	x	x	x	x	x
Bruecker <i>et al.</i> (2018)	x			x	x
Rodríguez-Martín, Salazar-González e Yaman (2019)	x	x	x	x	x
Wei <i>et al.</i> (2019)	x		x	x	
Rothenbächer (2019)	x	x		x	x
Qi <i>et al.</i> (2019)	x		x	x	
Chen, Shen e Hong (2019)	x	x	x	x	x
Chen <i>et al.</i> (2020)	x	x	x	x	x

Autores	Horizonte de planejamento	Limite de capacidade dos veículos	Todos os veículos saem e voltam ao depósito	Garantem a visita uma vez a cada cliente	Limite de período de trabalho
Wang <i>et al.</i> (2020)	x	x	x	x	x
Taslimi, Batta e Kwon (2020)	x	x	x	x	x
Gläser e Stücken (2021)	x	x	x	x	x
Van Engeland e Beliën (2021)	x	x		x	x
Gao <i>et al.</i> (2021)	x	x	x	x	x
Zhang <i>et al.</i> (2022)	x	x	x	x	x

Fonte: Autoria própria (2023)

No que diz respeito às restrições o Quadro 5, observa-se que cinco delas foram amplamente utilizadas pelos autores. O horizonte de planejamento é uma das restrições encontrada na totalidade dos estudos, seguida pela garantia de visitar cada cliente pelo menos uma vez, bem como a restrição de limite de capacidade dos veículos utilizados na coleta. Além disso, foram identificadas as restrições de que todos os veículos partem e retornam ao mesmo ponto e a limitação de período de trabalho.

Todas essas restrições têm o objetivo de aprimorar o modelo e torná-lo mais realista, refletindo as condições práticas e operacionais da coleta de resíduos de saúde. Assim sendo, a determinação dos parâmetros e restrições constitui uma etapa essencial no processo de estruturação do modelo, pois esses elementos são considerados o ponto de partida para a organização do modelo. Essas características foram fundamentadas no portfólio final resultante da segunda revisão de literatura descrita na Seção 3.2.1, e foram confirmadas por meio de reuniões remotas com especialistas da empresa responsável pela coleta de resíduos de saúde em estudo.

As reuniões foram conduzidas ao longo do quarto trimestre de 2022, com o propósito de validar as particularidades do roteamento específico da coleta de resíduos de saúde. Sua finalidade foi compreender completamente o processo de coleta e obter todas as informações necessárias para a validação dos parâmetros e restrições estabelecidos. Dessa forma, se assegura que o modelo desenvolvido seja representativo e aplicável à realidade operacional da empresa, garantindo resultados confiáveis e relevantes para a melhoria do sistema de coleta de resíduos de saúde.

Em relação aos principais parâmetros considerados neste estudo para o *PVRP*, foram definidos cinco parâmetros que devem ser considerados na montagem do modelo. A seguir, são apresentados detalhadamente cada um deles:

- a. Número de veículos: representa a quantidade de veículos disponíveis para realizar a coleta do resíduo em questão;
- b. Número de Clientes: corresponde à quantidade de clientes que serão visitados para a coleta dentro da localização do estudo de caso, também conhecido como nós do grafo;
- c. Horizonte de planejamento: refere-se ao período em que as rotas devem ser determinadas, dentro de um período semanal ou mensal de trabalho.
- d. Coordenadas Geográficas dos clientes: trata-se dos dados de latitude e longitude que indicam a localização dos clientes.
- e. Capacidade do veículo: representa o limite de carga que cada veículo pode transportar.

Com base nas características específicas do *PVRP* e no processo de coleta dos resíduos de saúde em estudo, é fundamental aplicar as restrições apropriadas para obter uma representação precisa de cada situação enfrentada. É importante destacar que a exclusão de algumas dessas restrições não diminui a relevância do problema, uma vez que cada restrição é utilizada para representar um caso específico a refletir a realidade. Dessa forma, foram identificados os seguintes supostos:

- a. Cada cliente deve ter uma visita atribuída em uma única agenda;
- b. Todos os clientes devem ser visitados nos dias correspondentes da agenda;
- c. Todas as rotas começam e terminam no depósito;
- d. A capacidade de carga do veículo deve ser respeitada;
- e. Cada cliente deve ser atendido apenas uma vez e por um único veículo.

Com base nos parâmetros e restrições definidos, a formulação matemática que descreve o problema é apresentada na seguinte subseção, evidenciando as características do modelo em função dos dados fornecidos pela empresa e da literatura selecionada.

3.3.3 Formulação Matemática

A formulação proposta a seguir representa uma abordagem eficaz que pode refletir com precisão as características do *PVRP*. Essa formulação é fundamentada nos estudos de Gao *et al.* (2021) e Chang *et al.* (2022), bem como nas análises do portfólio final realizadas nas seções 3.1 e 3.2, que identificaram a variante de *PVRP* mais adequada e o melhor método de solução com base nas características do problema em estudo.

Este modelo tem como finalidade explicar de forma clara e precisa o problema estudado nesta pesquisa, nesse sentido a continuação são apresentadas as notações utilizadas neste trabalho:

Índice e conjuntos:

- i Índice de grandes clientes
- j Índice de pequenos clientes
- N_i Conjunto de clientes grandes a serem atendidos
- N_j Conjunto de clientes pequenos a serem atendidos
- w_i Índice de tarefas, que significa os resíduos a serem coletados de clientes grandes
- w_j Índice de tarefas, que significa os resíduos a serem coletados de clientes pequenos
- W Conjunto de todas as tarefas
- v Índice de veículos
- V Número total de veículos disponíveis
- l Índice de dias úteis dentro do período de planejamento
- L Número total de dias no horizonte de planejamento
- Q Capacidade dos veículos v
- k_i Conjunto de combinações permitidas de dias de visita para clientes grandes
- k_j Conjunto de combinações permitidas de dias de visita para clientes pequenos
- r Agenda de visitas selecionado para clientes grandes e pequenos
- R Conjunto total da agenda para todos os clientes

Parâmetros:

- q_i Quantidade a ser coletada pelos clientes grandes no período L
- q_j Quantidade a ser coletada pelos clientes pequenos no período L

$d_{i,i+1}$	Distância de viagem entre clientes grandes
$d_{j,j+1}$	Distância de viagem entre clientes pequenos
a^{kt}	O valor um para os dias l nos quais é realizada a visita o zero caso contrário
M	Um número positivo suficientemente grande

As variáveis de decisão são:

y_i^l = Variável binária, definida como 1, se lixo do cliente grande i for coletado no dia l e 0 caso contrário.

y_j^l = Variável binária, definida como 1, se lixo do cliente pequeno j for coletado no dia l e 0 caso contrário.

X_{wi}^v = Variável binária, definida como 1 se a tarefa w_i de clientes grandes for atendida pelo veículo v e 0 caso contrário.

X_{wj}^v = Variável binária, definida como 1 se a tarefa w_j de clientes pequenos for atendida pelo veículo v e 0 caso contrário.

O objetivo do problema é minimizar a distância total percorrida pelos veículos de transporte. Para alcançar esse objetivo, a variável X_i^v indica se o veículo v viajou do nó i até o nó $i + 1$, adotando o valor 0 ou 1 para clientes grandes e se o veículo v viajou do nó j até o nó $j + 1$ para clientes pequenos, dependendo da distância entre clientes d_{ij} e do dia útil. A equação a seguir descreve essa relação:

$$\text{minimizar } \sum_{i \in N_i} \sum_{j \in N_j} \sum_{v \in V} \sum_{l \in L} d_{ij} X_{wi}^v X_{wj}^v \quad (1)$$

A seguir, serão apresentadas matematicamente as restrições identificadas na seção 3.4.2:

$$\sum_{i \in N_i, j \neq i} \sum_{v \in V} X_{wi,j}^v - \sum_{r \in R} a^{kt} y_i^l = 0 \quad \forall i \in N_i, \forall j \in N_j, \forall l \in L \quad (1)$$

$$\sum_{r \in R} y_{i,j}^l = 1 \quad \forall i \in N_i, \forall j \in N_j \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} X_{ij}^{vl} = \sum_{j \in N} X_{ij}^{vl} \quad \forall l \in L, \forall v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^{N_i} \sum_{j=0}^{N_j} X_{wi,j}^v \leq Q \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{v \in V} X_{wi,j}^v = 1, \quad j \in \{1, \dots, N_j\}, i \in \{1, \dots, N_i\} \quad (5)$$

$$u_i^k; y_i^l; X_{ij}^{vl} \in \{0,1\} \quad i, j \in N, l \in L, v \in V, k \in K \quad (6)$$

A restrição (1) considera que as visitas para cada ponto i ocorram apenas nos dias l designado, com base na combinação escolhida. Enquanto a restrição (2) garante que cada ponto i tenha apenas uma combinação permitida de dias de visita. A restrição (3) assegura que cada veículo que sai do depósito retorne ao mesmo.

A restrição (4) garante que a capacidade máxima do veículo não seja excedida, em relação à restrição (5) garante que o veículo viaje somente de um ponto i para um ponto j em um dia l se ambos os pontos estiverem alocados para esse mesmo dia, enquanto a restrição (6) está relacionada à integridade das variáveis de decisão.

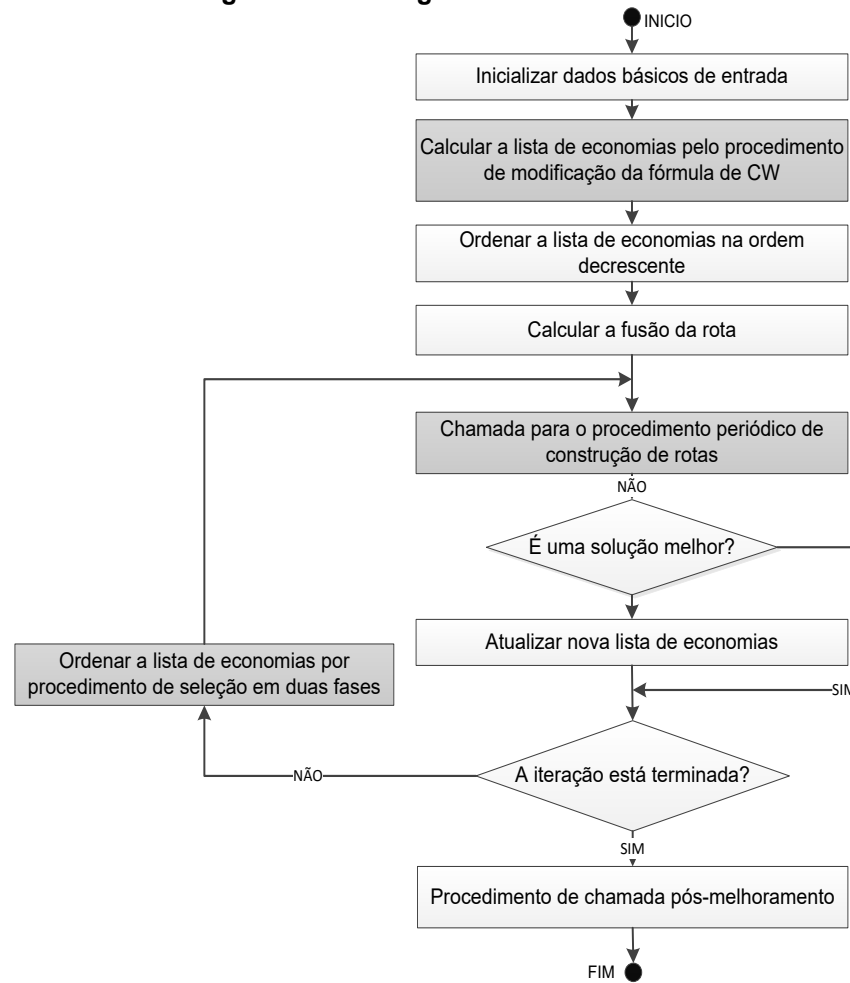
Este é um problema complexo de programação linear inteira que envolve dados de parâmetros, restrições e variáveis de decisão para 73 clientes localizados tanto na cidade de Ponta Grossa como em Carambeí. Nesse sentido, o uso de estratégias de solução baseadas em heurísticas permite a resolução de instâncias de problemas práticos, conforme apresentado na seção 3.2. Na subseção seguinte, serão mostrados os algoritmos utilizados na estrutura deste estudo.

3.3.4 Heurística construtiva *Clarke and Wright*

Conforme mencionado na Seção 3.2.2, a primeira estratégia de solução adotada é uma heurística de construção que utiliza o algoritmo *CW*. Os passos para aplicação dessa técnica foram fundamentados no trabalho de Pichpibul e Kawtummachai (2013), que aplicaram o *CW* na versão aberta do Problema de Veículos Capacitado, onde os veículos não precisam retornar ao depósito após completar o serviço.

Embora o tipo de *VRP* seja diferente nesse caso (sendo um *PVRP*), as devidas modificações foram realizadas para garantir que o método atenda às características dessa variante específica do *VRP* e, assim, produza soluções ainda mais eficientes e adequadas. O fluxograma do *CW* utilizado neste estudo pode ser visto na Figura 10, que mostra o processo detalhado de aplicação do algoritmo para a resolução do *PVRP* considerando os requisitos e restrições específicos do problema em estudo.

Figura 10 – Fluxograma do CW



Fonte: Adaptação de Pichpibul e Kawtummachai (2013)

Na Figura 10, são apresentados os passos indispensáveis à aplicação do algoritmo CW. Cumpre ressaltar que, para a elaboração deste algoritmo, foram adotadas as etapas propostas por Sasikumar, Kannan e Haq (2009), cuja premissa central consiste em combinar rotas individuais preliminares em rotas compostas de forma a maximizar a economia resultante dessa combinação.

Cada cliente é considerado como uma rota Independiente, representando a coleta de resíduos de saúde em um único veículo para cada tipo de cliente. Nesta etapa, as economias são calculadas para cada par de clientes considerando a possibilidade de unir suas rotas. No contexto deste estudo de caso, são contemplados dois tipos de clientes (grandes e pequeno), cada qual compreendendo um par, no qual se estima a economia gerada ao convergir suas rotas individuais em uma única rota composta. A economia é determinada a partir da discrepância entre o custo total de coleta das rotas individuais e o custo total da rota combinada.

Posteriormente ao cômputo das economias, estas são organizadas em ordem decrescente, o que implica que as fusões das rotas que proporcionam maiores economias são priorizadas. Depois, inicia-se a combinação das rotas de acordo com a hierarquia das economias, com as combinações mais vantajosas sendo geradas de maneira consecutiva, e os clientes sendo alocados nas rotas compostas, respeitando as capacidades dos dois veículos relativos a cada tipo de cliente.

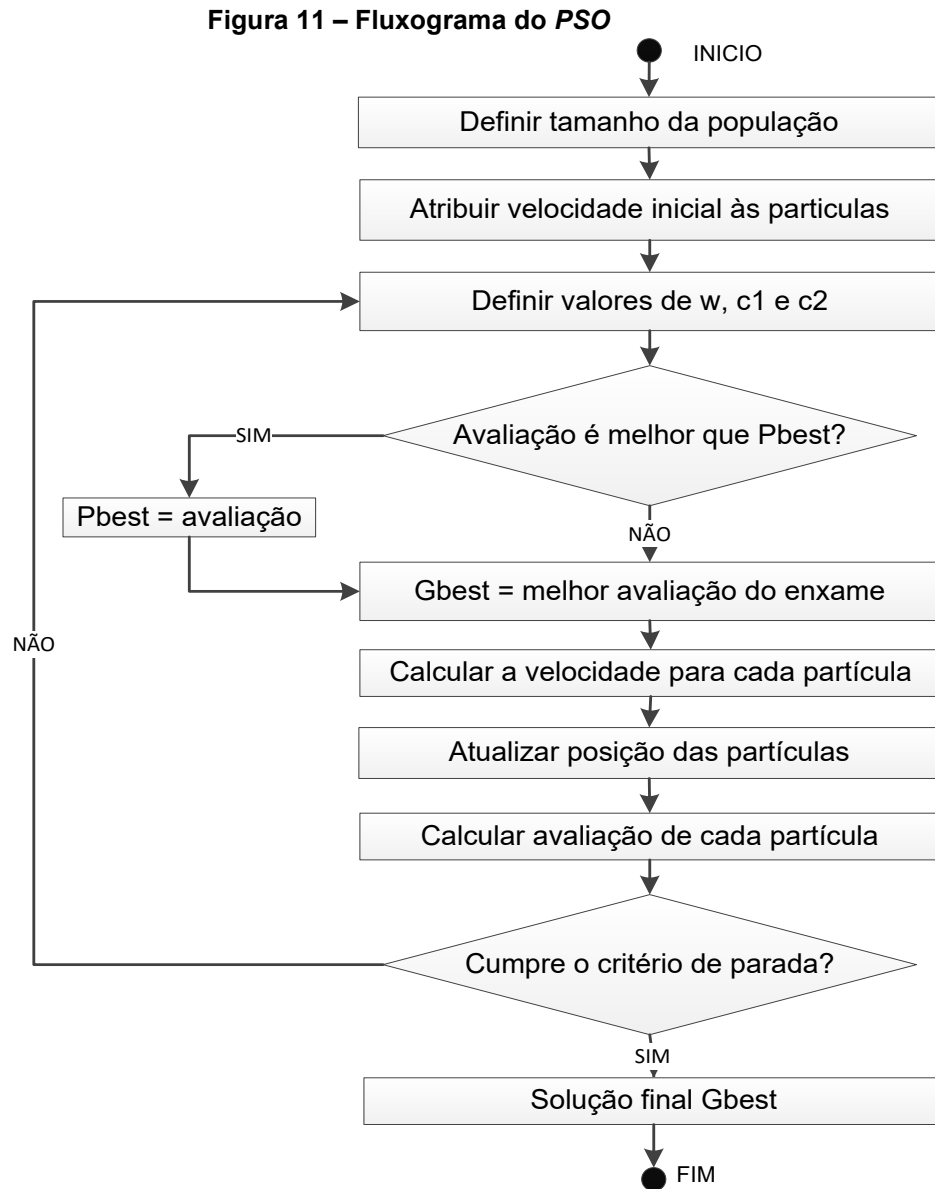
O processo de combinação prossegue até que todas as economias tenham sido contempladas ou até que um critério de parada seja atingido. Após a fase de fusão, é possível empreender um procedimento de refinamento para aprimorar as rotas compostas. Desse modo, o *CW* apresenta a vantagem de ser um método relativamente direto e ágil, fornecendo soluções aceitáveis.

3.3.5 Heurística de otimização *Particle Swarm Optimization (PSO)*

Com o propósito de buscar uma solução mais eficiente, foi adotada uma estratégia alternativa de aprimoramento, fundamentada na heurística de construção previamente mencionada. Nessa nova abordagem, optou-se por uma técnica inspirada nos princípios de *Particle Swarm Optimization (PSO)*, devido à sua simplicidade, facilidade de implementação e rápida convergência. Para a condução deste estudo, embasamo-nos nos trabalhos de Chen *et al.* (2019) e Gao *et al.* (2021), que lograram êxito na aplicação desse algoritmo para minimizar a distância total percorrida pelos veículos. Tais estudos evidenciaram que o algoritmo pode constituir uma ferramenta eficaz no suporte à tomada de decisões por parte do operador.

Na aplicação do algoritmo *PSO*, consideramos os seguintes parâmetros: um número de partículas equivalente a 20, representando as soluções candidatas empregadas no algoritmo; um valor de inércia de 0,5, que regula a influência da velocidade anterior das partículas durante a atualização; um coeficiente cognitivo de 0,5, que pondera a influência do melhor valor obtido pela própria partícula na atualização de sua posição; e um coeficiente social de 0,5, que pondera a influência do melhor valor encontrado por qualquer partícula no enxame na atualização da posição da partícula. Ademais, definiu-se o número de iterações como 3, indicando a quantidade de vezes que o algoritmo foi executado. Esses parâmetros foram criteriosamente escolhidos visando otimizar o desempenho do algoritmo *PSO* na resolução do problema em questão.

Inspirado no comportamento de enxames na natureza, como os movimentos coordenados de pássaros ou cardumes de peixes, conforme observado por Norouzi *et al.* (2015), a Figura 11 ilustra o fluxo de implementação de um *PSO* simples.



Fonte: Adaptação de (GONG *et al.*, 2012) e Chen *et al.* (2019)

O algoritmo *PSO* é iniciado com a geração inicial de uma população de partículas, sendo cada partícula uma representação viável do problema em análise. Cada partícula carrega consigo uma posição e uma velocidade, as quais são atualizadas a cada iteração do algoritmo. Adicionalmente, são definidos os parâmetros do algoritmo, incluindo o número de partículas, valores de inércia, os

coeficientes cognitivo e social, bem como o número de iterações, as mesmas que foram descritas, mas acima.

A subsequente execução do algoritmo compreende o cálculo da distância total percorrida pelas partículas, considerando as rotas propostas, e a avaliação do desempenho de cada partícula com base em critérios tais como distância percorrida e capacidade dos veículos. Posteriormente, ocorre a atualização das posições das partículas, tendo como base a posição anterior, a melhor posição pessoal individual (*Pbest*) e melhor posição global enxame (*Gbest*), obtidas até o momento. Nesse processo, os coeficientes cognitivo e social influenciam a ponderação desses três elementos na atualização das posições.

Em sequência, é realizada a avaliação da melhor solução encontrada pelo enxame até aquele ponto, com possibilidade de atualização da melhor posição global caso alguma partícula encontre uma solução superior à registrada anteriormente. Por outro lado, a verificação de parada ocorre considerando critérios como o número máximo de iterações alcançado ou a convergência das soluções.

A melhor solução obtida e então empregada para a alocação otimizada dos clientes aos veículos, de acordo com as rotas estabelecidas. Portanto, após detalhada apresentação do fluxograma do algoritmo *PSO*, fica evidenciado que esta abordagem oferece uma maneira eficaz de otimizar o planejamento das operações de coleta de resíduos de saúde, levando em consideração as restrições de capacidade dos veículos e visando à minimização das distâncias percorridas. Através da interação colaborativa das partículas, inspirada no comportamento de enxames de natureza, esse algoritmo prontamente converge para soluções que promovem eficiência e economia na execução das atividades de coleta.

Após a exposição dos dois algoritmos heurísticos propostos para a solução do modelo matemático, a próxima seção do texto descreve a implementação computacional deles.

3.4 Etapa 4: Implementação computacional do modelo

Nesta seção, os algoritmos *CW* e *PSO*, descritos na Seção 3.2, foram implementados computacionalmente como algoritmos heurísticos, com o objetivo de resolver o modelo matemático proposto para otimizar a distância percorrida pelos veículos no contexto de um *PVRP*.

Após analisar os softwares utilizados na revisão de literatura apresentada na Seção 3.2.2 decidiu-se implementar computacionalmente os algoritmos utilizando o *Spyder*, que é um ambiente de desenvolvimento integrado baseado na linguagem *Python 3.10.10*. Essa escolha foi motivada pelo fato de *Python* ser uma linguagem de código aberto, que oferece uma ampla variedade de bibliotecas para cálculos complexos, além de permitir integração com outros softwares e facilitar a prototipagem e experimentação rápida. Sua versatilidade também é vantajosa no que diz respeito à solução de problemas de roteamento de veículos. Além disso, o *Python* não requer a compra de software nem aquisição de licença para utilizá-lo, o que possibilita à empresa em estudo trabalhar sem problemas.

Os testes foram conduzidos em um computador equipado com um processador AMD Ryzen, 12 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11 Pro de 64 bits. Para garantir a eficácia da aplicação computacional do modelo, os algoritmos foram executados 20 vezes para cada grupo de clientes, utilizando os dados em cada iteração. A comparação entre os algoritmos propostos foi realizada analisando os resultados obtidos, levando em consideração as características próprias do processo de coleta dos resíduos de saúde e comparando com os dados da empresa.

A próxima seção apresentará a aplicação do modelo como um estudo de caso, com base na revisão de literatura e considerando as características específicas do processo de coleta dos resíduos de saúde.

3.5 Etapa 5: Aplicação do modelo

Esta etapa consistiu na validação do modelo proposto por meio de sua aplicação em uma empresa especializada no desenvolvimento de soluções ambientais. A empresa em questão realiza a coleta, remoção e destinação de diversos tipos de resíduos, além de atuar em projetos de limpeza de rodovias, remover resíduos de praças e coletar resíduos sólidos em áreas urbanas. Ademais fornece serviços de consultoria e assessoria na área ambiental para projetos novos ou em andamento.

A empresa escolhida para o estudo de caso está situada no estado do Paraná e é responsável pela gestão, movimentação e destino de diversos tipos de resíduos. Para fins de estudo desta pesquisa, foi realizada a proposta para o modelo matemático resolvido mediante dois algoritmos heurísticos para o serviço de coleta de resíduos de saúde.

Para realizar a execução computacional mencionada na Seção 3.4, foram conduzidos testes utilizando dados fornecidos por uma empresa de resíduos de saúde, abordando um problema de roteamento de veículos periódico para quatro semanas. O número de clientes atendidos e suas localizações geográficas são elementos relevantes nesse contexto, uma vez que determinam a quantidade de soluções candidatas a serem avaliadas em cada iteração, além de influenciarem diretamente no cálculo das distâncias percorridas pelos veículos.

No caso específico da coleta de resíduos de saúde, o sistema conta com um total de 73 clientes, também conhecidos como nós ou pontos, distribuídos geograficamente entre as cidades de Ponta Grossa e Carambeí. A Tabela 1 apresenta um resumo dos clientes atendidos em cada uma dessas localidades.

Tabela 1 – Distribuição de clientes atendidos por cidade

Cidade	Clientes Pequenos	Clientes Grandes	Subtotal
Ponta Grossa	40	10	50
Carambeí	23	-	23
TOTAL			73

Fonte: Autoria própria (2023)

Por outro lado, conforme mencionado na seção 3.3.1, a empresa classifica seus clientes em dois grupos distintos: grandes e pequenos. A Tabela 1 demonstra que a empresa atende um número maior de clientes pequenos, totalizando 63 clientes nas duas cidades. Em contrapartida, em Carambeí, a coleta de resíduos é realizada uma vez por mês, abrangendo 23 clientes pequenos em uma única jornada de trabalho, enquanto existe um total de 10 clientes grandes, todos localizados em Ponta Grossa.

Além disso, considera-se a quantidade de resíduos coletados por cada cliente. Com base nos dados iniciais da empresa e no diagnóstico realizado, foram geradas quantidades aleatórias de resíduos para um período de quatro semanas. De acordo com os dados da empresa obtidos durante o diagnóstico, os clientes pequenos geram, em média, cerca de 1.000 kg de resíduos diariamente, enquanto os clientes grandes geram aproximadamente 1.500 kg. Também é importante levar em conta que as capacidades dos veículos consideram uma quantidade mínima aceitável dentro de uma mesma semana. As quantidades de resíduos por semana estão apresentadas no Apêndice B.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os dados das quantidades a serem coletadas por tipo de cliente e cidade (Ponta Grossa -PG e Carambeí -C) a cada semana. Os clientes são enumerados de 1 a 73, com base nos dados das coordenadas geográficas fornecidos pela empresa.

Tabela 2 – Quantidade de resíduos coletados dos clientes grandes (kg)

Cliente	Cidade	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Total
1	PG	500	450	462	489	1.901
2	PG	518	454	470	449	1.891
3	PG	320	497	315	482	1.614
7	PG	437	320	454	320	1.531
8	PG	519	319	445	318	1.601
9	PG	456	525	319	448	1.748
13	PG	487	440	476	491	1.894
27	PG	319	320	318	312	1.269
37	PG	543	539	447	470	1.999
38	PG	318	317	319	317	1.271

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 3 – Quantidade de resíduos coletados dos clientes pequenos (kg)

(continua)

Cliente	Cidade	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Total
4	PG	93	99	166	183	541
5	PG	92	122	199	160	573
6	PG	112	126	179	211	628
10	PG	120	114	232	298	764
11	PG	94	100	128	99	421
12	PG	120	113	269	254	756
14	PG	99	97	90	147	433
15	PG	117	119	195	274	705
16	PG	101	149	214	271	735
17	PG	94	99	178	92	463
18	PG	53	73	109	82	317
19	PG	80	98	158	80	416
20	PG	71	100	249	172	592
21	PG	79	96	181	157	513
22	PG	65	97	156	161	479
23	PG	82	99	132	124	437
24	PG	132	145	161	251	689
25	PG	56	94	139	160	449
26	PG	150	185	348	301	984
28	PG	107	131	162	334	734
29	PG	88	128	160	145	521
30	PG	108	123	176	128	535
31	PG	104	125	196	173	598
32	PG	75	130	152	128	485
33	PG	68	95	204	128	495
34	PG	76	98	184	154	512
35	PG	71	84	168	178	501
36	PG	101	121	181	273	676
39	PG	99	90	111	165	465
40	PG	87	94	139	107	427
41	PG	139	185	296	332	952
42	PG	107	125	198	282	712

Tabela 3 – Quantidade de resíduos coletados dos clientes pequenos (kg)						
Cliente	Cidade	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Total
43	PG	76	125	162	181	544
44	PG	71	75	161	188	495
45	PG	85	147	178	259	669
46	PG	102	151	216	299	768
47	C	15	17	12	9	53
48	C	20	5	10	15	50
49	C	12	15	9	6	42
50	C	9	10	8	13	40
51	C	11	7	7	8	33
52	C	14	12	15	10	51
53	C	10	6	10	12	38
54	C	19	10	14	11	54
55	C	15	12	13	11	51
56	C	10	9	11	12	42
57	C	9	11	12	14	46
58	C	18	12	8	11	49
59	C	8	10	5	5	28
60	C	11	9	10	3	33
61	C	11	10	16	18	55
62	C	18	8	11	11	48
63	C	13	10	10	20	53
64	C	12	16	10	14	52
65	C	14	9	10	11	44
66	C	9	8	6	9	32
67	C	10	15	9	6	40
68	C	10	6	8	8	32
69	C	5	8	7	11	31
70	PG	84	149	168	220	621
71	PG	93	169	307	297	866
72	PG	103	128	200	185	616
73	PG	61	82	232	172	547
Total		3.998	4.915	7.665	8.053	24.631

Fonte: Autoria própria (2023)

As Tabelas 2 e 3 expõem a quantidade de resíduos a serem coletados, classificados por tipo de cliente, para cada uma das semanas. É importante ressaltar que ao longo do mês, a coleta total aproxima-se de 16.719 kg de resíduos provenientes dos clientes pequenos enquanto os clientes grandes contribuem com 24.631 kg.

Por outro lado, considerou-se a frequência necessária para a coleta dos resíduos de saúde nas duas cidades. Tal análise decorre do fato de que clientes que geram volumes mais substanciais de resíduos demandam coletas com maior frequência, ao passo que clientes com menores quantidades de resíduos requerem uma periodicidade reduzida.

A frequência de visitas pode variar de acordo com a quantidade de resíduos a ser coletada, englobando um intervalo que abarca desde uma visita por período até

visitas diárias. Para este estudo, os dados fornecidos pela empresa foram considerados e estabeleceu-se um horizonte de planejamento de cinco dias. Foram analisadas frequências de uma, duas, três e cinco visitas por semana, conforme evidenciado na Tabela 4.

Tabela 4 – Tipos de clientes e frequência de visita

Tipo de cliente	Número de Clientes	Período de planejamento (dias)	Frota máxima (u/dia)	Demanda (kg/dia)	Frequência de visitas por período
				≤ 100	1
Pequenos	63	5	1	101 a 135	2
				136 a 175	3
				176 a 325	3
Grandes	10	5	1	326 a 550	5

Fonte: Autoria própria, (2023)

Com base nas frequências de visitas estabelecidas, foram designadas as visitas para cada cliente em um intervalo de planejamento de cinco dias. Além disso, foram disponibilizados dois veículos para cada tipo de cliente.

Para assegurar uma operação eficiente, torna-se essencial considerar a existência de dois pontos fixos que desempenham um papel crucial a cada dia durante o período de planejamento: o ponto 0, que representa o depósito de onde os veículos partem em cada saída de trabalho, e o ponto 74, que representa a autoclave, local onde os veículos descarregam os resíduos antes de retornarem ao depósito para finalizar suas jornadas de trabalho.

Levando em consideração toda as características próprias do estudo de caso e os ajustes relevantes para à aplicação dos algoritmos heurísticos de natureza computacional, a próxima seção contempla a exposição dos resultados alcançados após a condução meticulosa do estudo em questão. Esses resultados, foram analisados, bem como as lições de maior destaque extraídas do processo, serão devidamente relatados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e analisados os resultados obtidos por meio da aplicação do modelo proposto neste estudo. O capítulo foi estruturado em três seções distintas. As seções 4.1 e 4.2 abordam os resultados alcançados por meio da aplicação dos algoritmos *CW* e *PSO*, respectivamente, considerando as características singulares de cada um. Já na seção 4.3, são expostas as principais discussões deste estudo, proporcionando uma análise comparativa entre os resultados alcançados e os dados iniciais fornecidos pela empresa.

4.1 Resultados gerados pela heurística construtiva de *Clarke and Wright (CW)*

O problema abordado neste estudo foi tratado inicialmente empregando o algoritmo de construção *CW*, conforme detalhado na Seção 3.3 deste trabalho, foi aplicado para 4 semanas, considerando diferentes dados de demanda para cada tipo de cliente: pequenos e grandes.

Os resultados obtidos para os clientes pequenos estão apresentados na Tabela 5, enquanto os resultados para os clientes grandes são exibidos na Tabela 6. Ambas as tabelas fornecem informações sobre a semana analisada, o dia da semana, as rotas percorridas, a quantidade de clientes atendidos, a sequência dos veículos, a distância total percorrida durante o percurso e o valor acumulado por dia.

Os resultados obtidos ilustram a eficácia do algoritmo *CW* na formulação de soluções para o *PVRP*, levando em consideração as particularidades intrínsecas a cada categoria de cliente e a frequência de visitas que ele realiza tanto na cidade de Ponta Grossa quanto em Carambeí.

Tabela 5 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo CW – Clientes pequenos
(continua)

Semana	Dia - rota	Quantidade de clientes	Rota	Distância percorrida (km)	
SEMANA 1	Seg	R1	7	[0, 16, 26, 30, 32, 43, 46, 71, 74, 0]	47,63
		R2	7	[0, 24, 28, 31, 41, 45, 70, 72, 74, 0]	34,15
	Ter	R1	7	[0, 5, 20, 22, 25, 34, 39, 44, 74, 0]	44,50
		R2	6	[0, 19, 21, 23, 33, 35, 40, 74, 0]	44,20
	Qua	R1	9	[0, 6, 12, 16, 24, 28, 31, 41, 46, 73, 74, 0]	50,43
		R2	8	[0, 10, 15, 18, 26, 30, 36, 42, 72, 74, 0]	43,08
	Qui	R1	23	[0, 47, 48, 49, 51, 56, 50, 52, 57, 53, 54, 58, 55, 59, 60, 61, 69, 62, 63, 64, 68, 65, 66, 67, 74, 0]	90,98
	Sex	R1	7	[0, 4, 10, 12, 15, 26, 36, 42, 74, 0]	33,56
		R2	6	[0, 6, 11, 14, 17, 29, 41, 74, 0]	56,68
					445,21

Tabela 5– Rotas e distâncias por semana do algoritmo CW – Clientes pequenos					(conclusão)			
Semana	Dia - rota	Quantidade de clientes	Rota	Distância percorrida (km)				
SEMANA 2	Seg	R1	5	[0, 16, 26, 41, 46, 71, 74, 0]	43,90	412,96		
		R2	4	[0, 24, 28, 45, 70, 74, 0]	30,70			
	Ter	R1	6	[0, 5, 20, 22, 30, 32, 72, 74, 0]	37,91			
		R2	5	[0, 19, 21, 29, 31, 43, 74, 0]	45,30			
	Qua	R1	8	[0, 6, 11, 15, 18, 26, 36, 42, 46, 74, 0]	39,14			
		R2	8	[0, 10, 12, 16, 24, 28, 41, 44, 73, 74, 0]	44,81			
	Qui	R1	7	[0, 5, 25, 31, 33, 35, 40, 72, 74, 0]	57,31			
		R2	6	[0, 23, 30, 32, 34, 39, 43, 74, 0]	17,79			
	Sex	R1	6	[0, 4, 10, 12, 15, 26, 41, 74, 0]	37,07			
		R2	6	[0, 6, 11, 14, 17, 36, 42, 74, 0]	59,03			
	SEMANA 3	Seg	R1	6	[0, 12, 20, 26, 41, 46, 71, 74, 0]		48,47	414,00
			R2	5	[0, 16, 24, 28, 45, 70, 74, 0]		30,43	
Ter		R1	6	[0, 5, 21, 29, 31, 33, 72, 74, 0]	46,72			
		R2	5	[0, 19, 22, 30, 32, 43, 74, 0]	26,88			
Qua		R1	8	[0, 6, 12, 16, 20, 26, 36, 42, 46, 74, 0]	39,15			
		R2	8	[0, 10, 15, 18, 24, 28, 41, 44, 73, 74, 0]	46,15			
Qui		R1	7	[0, 5, 25, 31, 33, 35, 40, 72, 74, 0]	60,00			
		R2	6	[0, 23, 29, 30, 32, 34, 39, 43, 74, 0]	18,10			
Sex		R1	7	[0, 4, 10, 12, 15, 26, 41, 73, 74, 0]	41,01			
		R2	6	[0, 6, 11, 14, 17, 36, 42, 74, 0]	57,09			
SEMANA 4		Seg	R1	5	[0, 10, 24, 28, 45, 70, 74, 0]	27,62	412,10	
			R2	5	[0, 16, 26, 41, 46, 71, 74, 0]	40,98		
	Ter	R1	7	[0, 5, 20, 22, 30, 32, 43, 72, 74, 0]	53,64			
		R2	7	[0, 19, 21, 29, 31, 35, 44, 73, 74, 0]	23,76			
	Qua	R1	8	[0, 6, 12, 16, 24, 28, 41, 45, 70, 74, 0]	50,25			
		R2	8	[0, 10, 15, 18, 26, 36, 42, 46, 71, 74, 0]	41,26			
	Qui	R1	8	[0, 5, 25, 31, 33, 35, 40, 44, 73, 74, 0]	60,81			
		R2	7	[0, 23, 30, 32, 34, 39, 43, 72, 74, 0]	17,68			
	Sex	R1	6	[0, 4, 10, 12, 15, 26, 41, 74, 0]	37,07			
		R2	6	[0, 6, 11, 14, 17, 36, 42, 74, 0]	59,03			

Fonte: Autoria própria, (2023)

Conforme evidenciado na Tabela 5, foi estabelecido um período de planejamento contínuo de cinco dias, de segunda a sexta-feira, para os clientes categorizados como pequenos. Foi alocado um veículo com capacidade de transporte de até 1.000 kg por dia. Na primeira semana, a coleta de resíduos de saúde foi realizada tanto na cidade de Ponta Grossa quanto em Carambeí, abrangendo um total de 63 clientes. Normalmente, a quinta-feira foi designada para a coleta de resíduos

em Carambeí, em consonância com as informações fornecidas pela empresa, onde estão localizados 23 clientes. Tal distribuição levou em consideração fatores como a distância entre o depósito e a autoclave, além da demanda reduzida desses clientes. Já nas semanas 2, 3 e 4, foram atendidos 40 clientes localizados na cidade de Ponta Grossa.

Em média, a distância percorrida pelos veículos é aproximadamente de 413,48 km por semana. É notório que a semana em que ocorre a visita à cidade de Carambeí representa a maior distância percorrida pelos veículos. Além disso, é possível observar que os veículos seguem duas rotas distintas, denominadas R1 e R2, com a finalidade de assegurar que a capacidade dos veículos não seja ultrapassada, considerando a quantidade de demandas. Essa estratégia possibilita a realização de duas rotas em um único dia. Por outro lado, de acordo com os resultados dessas quatro semanas, estima-se que o veículo percorreu um total aproximado de 1.684,27 km.

Tabela 6 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo CW – Clientes grandes

Semana	Dia -rota	Quantidade de clientes	Rota	Distância percorrida (km)
SEMANA 1	Seg R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	66,37
	Ter R1	7	[0, 1, 2, 7, 8, 9, 13, 37, 74, 0]	50,94
	Qu R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
	Qui R1	7	[0, 1, 2, 7, 8, 9, 13, 37, 74, 0]	49,38
	Sex R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
SEMANA 2	Seg R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	70,80
	Ter R1	6	[0, 1, 2, 3, 9, 13, 37, 74, 0]	47,00
	Qua R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
	Qui R1	6	[0, 1, 2, 3, 9, 13, 37, 74, 0]	45,60
	Sex R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	66,39
SEMANA 3	Seg R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	68,37
	Ter R1	6	[0, 1, 2, 7, 8, 13, 37, 74, 0]	42,90
	Qua R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
	Qui R1	6	[0, 1, 2, 7, 8, 13, 37, 74, 0]	42,90
	Sex R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
SEMANA 4	Seg R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
	Ter R2	6	[0, 1, 2, 3, 9, 13, 37, 74, 0]	45,60
	Qua R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	69,37
	Qui R2	6	[0, 1, 2, 3, 9, 13, 37, 74, 0]	47,00
	Sex R1	10	[0, 1, 2, 3, 7, 8, 9, 13, 27, 37, 38, 74, 0]	66,89

Fonte: Autoria própria, (2023)

Com base na Tabela 6, identificam-se dez clientes classificados como grandes, todos localizados na cidade de Ponta Grossa. Considerando a disponibilidade de um veículo com capacidade de carga de 1.500 kg por dia ao longo de cinco dias úteis, a realização de uma única rota se revela suficiente. Em média, é percorrida uma distância total de 298,70 quilômetros por semana e um total de 1.195,73 km ao longo das quatro semanas

As frequências de visitas são estabelecidas em consonância com as demandas individuais de cada cliente grande. Aproximadamente sete clientes necessitam de coleta cinco vezes por semana, enquanto os demais requerem apenas três vezes por semana. Essa variabilidade de frequência considera as particularidades inerentes a cada cliente, baseada nos registros históricos da empresa.

Os resultados alcançados por meio da aplicação do algoritmo de *CW* demonstraram a viabilidade de construir rotas de trabalho com distâncias eficientes, levando em consideração as demandas singulares de cada tipo de clientes ao longo de cada semana e, simultaneamente, respeitando as capacidades dos veículos. Tal abordagem resultou em uma distribuição adequada balanceada das tarefas de coleta dos resíduos durante o período de planejamento.

Na próxima seção, os resultados da aplicação do algoritmo *Particle Swarm Optimization (PSO)*, uma metodologia de otimização empregada para resolver o problema de roteamento de veículos, serão apresentados.

4.2 Resultados da heurística de otimização *Particle Swarm Optimization (PSO)*

No âmbito deste estudo, foi eleita a aplicação do algoritmo *PSO* considerado o algoritmo de otimização para abordar o modelo matemático proposto, cuja fundamentação se encontra na Seção 3.3 deste trabalho. Para a efetiva implementação do *PSO*, foram realizados ajustes apropriados nas características computacionais, atendendo para aspectos como o número de partículas, recursos disponíveis e outras variáveis peculiares ao problema em questão.

Os resultados decorrentes do emprego do algoritmo *PSO* ao longo de quatro semanas, discriminados de acordo com o tipo de cliente, são apresentados nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo PSO – Clientes pequenos

Semana	Dia da semana	Quantidade de clientes	Rota	Distância percorrida (km)	
SEMANA 1	Seg	R1	7	[0, 46, 26, 16, 30, 32, 71, 43, 74, 0]	45,72
		R2	7	[0, 28, 24, 41, 70, 45, 31, 72, 74, 0]	32,78
	Ter	R1	7	[0, 44, 39, 22, 20, 25, 34, 5, 74, 0]	41,80
		R2	6	[0, 21, 19, 23, 40, 33, 35, 74, 0]	37,76
	Qua	R1	9	[0, 46, 73, 28, 16, 24, 41, 31, 6, 12, 74, 0]	48,93
		R2	8	[0, 26, 18, 36, 42, 30, 72, 15, 10, 74, 0]	41,80
	Qui	R1	23	[0, 68, 56, 61, 65, 49, 66, 67, 51, 47, 63, 48, 64, 62, 59, 55, 52, 60, 53, 50, 54, 58, 57, 69, 74, 0]	85,20
	Sex	R1	8	[0, 26, 36, 42, 15, 10, 12, 4, 74, 0]	32,36
		R2	7	[0, 17, 41, 6, 11, 29, 14, 74, 0]	54,65
	SEMANA 2	Seg	R1	5	[0, 46, 26, 16, 41, 71, 74, 0]
R2			4	[0, 28, 24, 70, 45, 74, 0]	20,90
Ter		R1	6	[0, 22, 20, 30, 32, 72, 5, 74, 0]	32,57
		R2	5	[0, 21, 19, 31, 43, 29, 74, 0]	38,93
Qua		R1	8	[0, 46, 26, 18, 36, 42, 6, 15, 11, 74, 0]	37,74
		R2	8	[0, 73, 44, 28, 16, 24, 41, 10, 12, 74, 0]	43,20
Qui		R1	7	[0, 40, 25, 33, 35, 31, 72, 5, 74, 0]	54,56
		R2	6	[0, 23, 34, 30, 32, 43, 39, 74, 0]	16,94
Sex		R1	6	[0, 26, 41, 15, 10, 12, 4, 74, 0]	32,50
		R2	6	[0, 17, 36, 42, 6, 11, 14, 74, 0]	51,76
SEMANA 3	Seg	R1	7	[0, 46, 20, 26, 41, 71, 12, 74, 0]	37,47
		R2	6	[0, 28, 16, 24, 70, 45, 74, 0]	23,53
	Ter	R1	7	[0, 21, 33, 31, 72, 29, 5, 74, 0]	44,56
		R2	6	[0, 22, 19, 30, 32, 43, 74, 0]	25,64
	Qua	R1	9	[0, 46, 20, 26, 16, 36, 42, 6, 12, 74, 0]	37,34
		R2	9	[0, 73, 44, 28, 24, 18, 41, 15, 10, 74, 0]	44,01
	Qui	R1	8	[0, 40, 25, 33, 35, 31, 72, 5, 74, 0]	56,93
		R2	8	[0, 39, 23, 34, 30, 32, 43, 29, 74, 0]	17,17
	Sex	R1	8	[0, 73, 26, 41, 15, 10, 12, 4, 74, 0]	34,42
		R2	7	[0, 17, 36, 42, 6, 11, 14, 74, 0]	47,92
SEMANA 4	Seg	R1	6	[0, 28, 24, 70, 45, 10, 74, 0]	22,83
		R2	6	[0, 46, 26, 16, 41, 71, 74, 0]	33,87
	Ter	R1	8	[0, 22, 20, 30, 32, 72, 43, 5, 74, 0]	53,64
		R2	7	[0, 73, 44, 21, 19, 35, 31, 74, 0]	23,76
	Qua	R1	9	[0, 28, 16, 24, 41, 70, 45, 6, 12, 74, 0]	49,24
		R2	8	[0, 46, 26, 18, 36, 42, 71, 15, 10, 74]	40,43
	Qui	R1	9	[0, 73, 44, 40, 25, 33, 35, 31, 5, 74, 0]	58,42
		R2	8	[0, 39, 23, 34, 30, 32, 72, 43, 74, 0]	16,98
	Sex	R1	7	[0, 26, 41, 15, 10, 12, 4, 74, 0]	31,2
		R2	7	[0, 17, 36, 42, 6, 11, 14, 74, 0]	49,68

Fonte: Autoria própria, (2023)

As mesmas características adotadas no algoritmo *CW* para atender os clientes classificados como pequenos foram aplicadas ao algoritmo *PSO*. Conforme detalhado na Tabela 7, na primeira semana, procedeu-se à coleta de resíduos de saúde de um total de 63 clientes, abrangendo tanto Ponta Grossa quanto Carambeí. Nas semanas 2, 3 e 4, foram atendidos somente 40 clientes em Ponta Grossa. A capacidade de carga diária do veículo utilizado manteve-se em 1.000 kg, com a definição das frequências de visitas levando em conta as demandas específicas de cada cliente.

Em relação às distâncias percorridas, o algoritmo *PSO*, promoveu uma média de 374,52 km por semana, visando a minimização logística. Para tal, foram criadas duas rotas de trabalho ao longo do dia, respeitando-se rigorosamente a restrição de não ultrapassar a capacidade de carga dos veículos. Essa restrição foi guiada pelo propósito de equilibrar a distribuição das demandas, garantindo assim, uma operação eficaz. Paralelamente, de acordo com os resultados obtidos ao longo dessas quatro semanas, estima-se que o veículo tenha percorrido um total de 1.529,02 km aproximadamente.

Tabela 8 – Rotas e distâncias por semana do algoritmo PSO – Clientes grandes

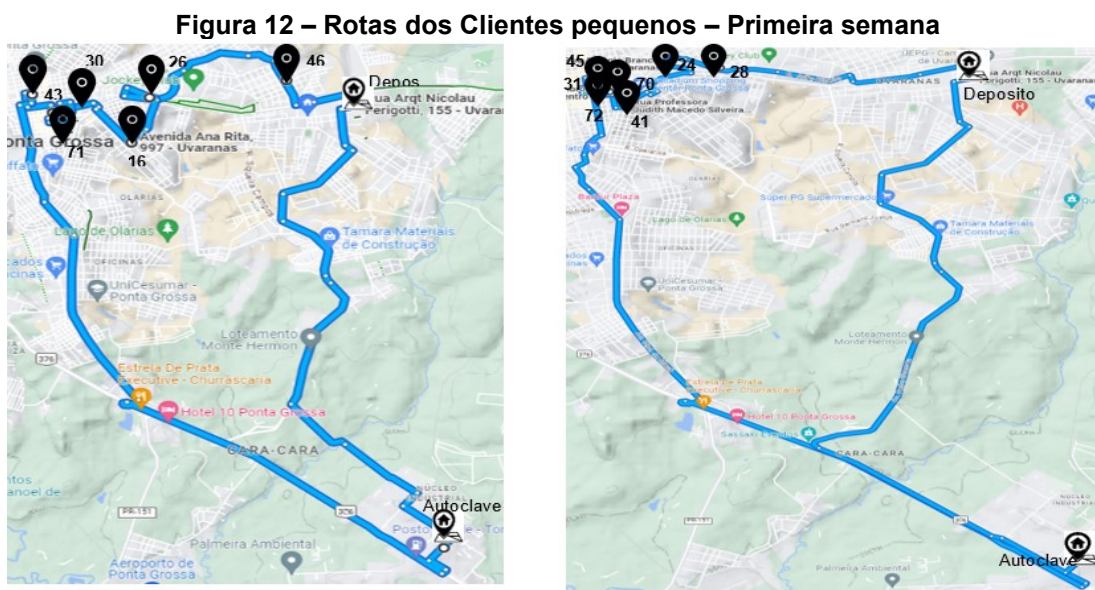
Semana	Dia da semana	Quantidade de clientes	Rota	Distância percorrida (km)		
SEMANA 1	Seg	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
	Ter	R1	7	[0, 1, 37, 7, 2, 8, 13, 9, 74, 0]	47,68	
	Qua	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	289,16
	Qui	R1	7	[0, 1, 37, 7, 2, 8, 13, 9, 74, 0]	47,68	
	Sex	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
SEMANA 2	Seg	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
	Ter	R1	6	[0, 1, 37, 2, 13, 3, 9, 74, 0]	42,20	
	Qua	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	278,20
	Qui	R1	6	[0, 1, 37, 2, 13, 3, 9, 74, 0]	42,20	
	Sex	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
SEMANA 3	Seg	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
	Ter	R1	6	[0, 1, 37, 7, 2, 8, 13, 74, 0]	40,60	
	Qua	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	275,00
	Qui	R1	6	[0, 1, 37, 7, 2, 8, 13, 74, 0]	40,60	
	Sex	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
SEMANA 4	Seg	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	
	Ter	R2	6	[0, 1, 37, 2, 13, 3, 9, 74, 0]	42,20	
	Qua	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	278,20
	Qui	R2	6	[0, 1, 37, 2, 13, 3, 9, 74, 0]	42,20	
	Sex	R1	10	[0, 1, 27, 37, 7, 2, 8, 13, 3, 38, 9, 74, 0]	64,60	

Fonte: Autoria própria, (2023)

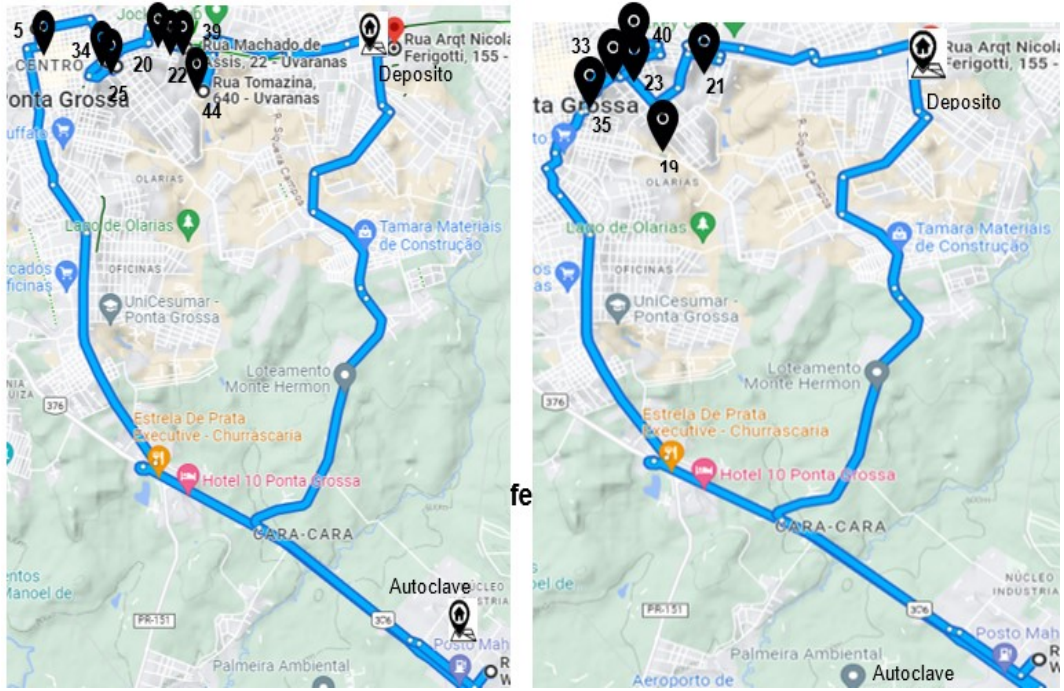
Após empregar o algoritmo *PSO* para atender aos clientes classificados como grandes, conforme ilustrado na Tabela 8, foram consideradas as mesmas características aplicadas no algoritmo *CW*. No total, dez clientes localizados em Ponta Grossa são atendidos por um veículo com capacidade de carga de 1.500 kg por dia. A média semanal da distância percorrida foi de 278,20 km, e as visitas ocorrem de três a cinco vezes por semana, ajustando-se às particularidades de demanda de cada cliente.

Adicionalmente, com base nos resultados obtidos ao longo dessas quatro semanas, estimou-se que o veículo percorreu um total de 1.120,56 km aproximadamente. A adoção do algoritmo *PSO* como algoritmo de otimização para solucionar o modelo proposto revelou resultados promissores, destacando-se a notável redução nas distâncias percorridas pelos veículos durante o período de planejamento.

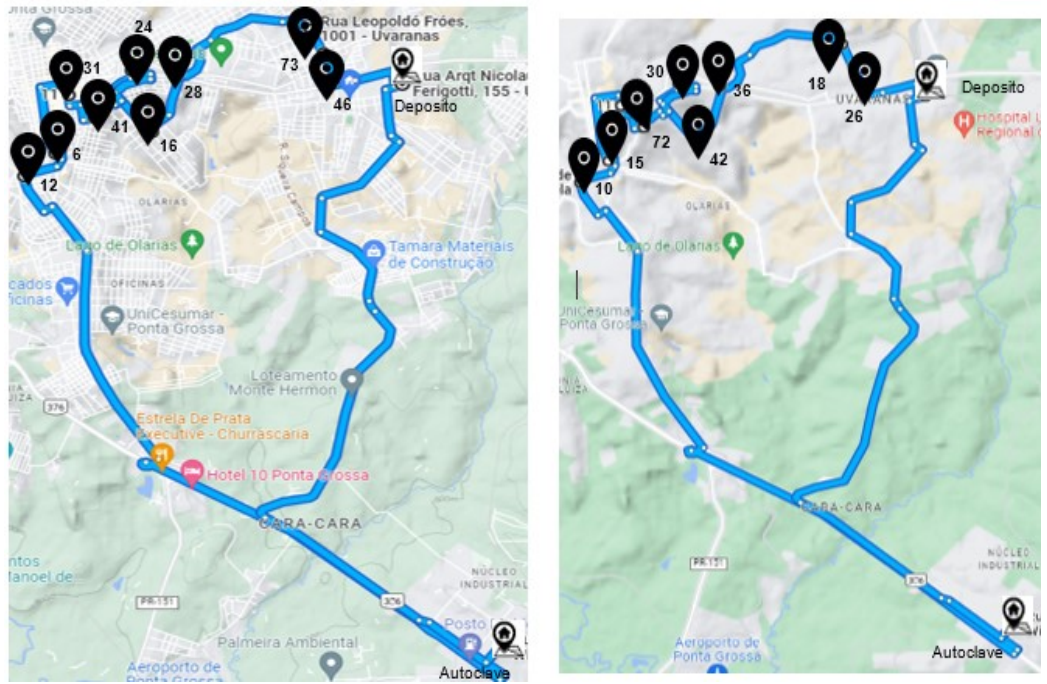
Por outro lado, a análise dos resultados apresentados evidência que, ao utilizar o algoritmo *PSO*, as rotas foram otimizadas de forma mais eficiente em comparação com o algoritmo *CW*. É relevante ressaltar que todas as visitas aos clientes foram realizadas conforme ao planejado. As rotas foram então integradas à plataforma Google Maps, proporcionando uma representação visual das trajetórias percorridas pelos clientes em um dia útil. Esta representação pode ser observada nas Figuras 12 e 13, as quais ilustram as rotas específicas para cada tipo de cliente durante a primeira semana.



(a) Segunda-feira Rota 1 e Rota 2



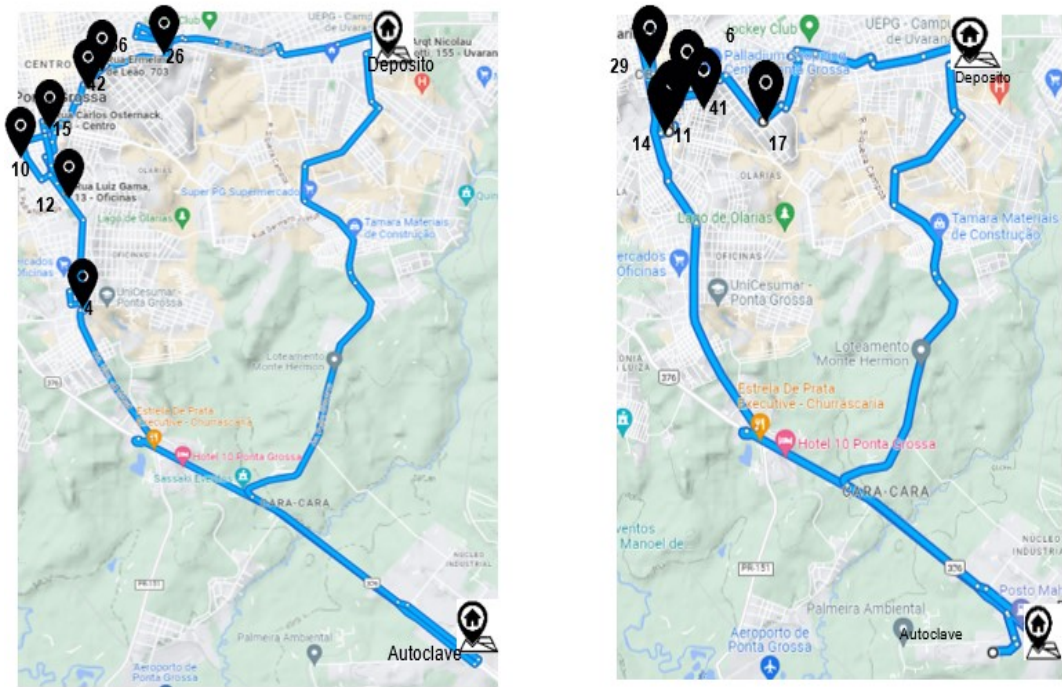
(b) Terça-feira Rota 1 e Rota 2



(c) Quarta-feira Rota 1 e Rota 2



(d) Quinta-feira Rota 1 e Rota 2

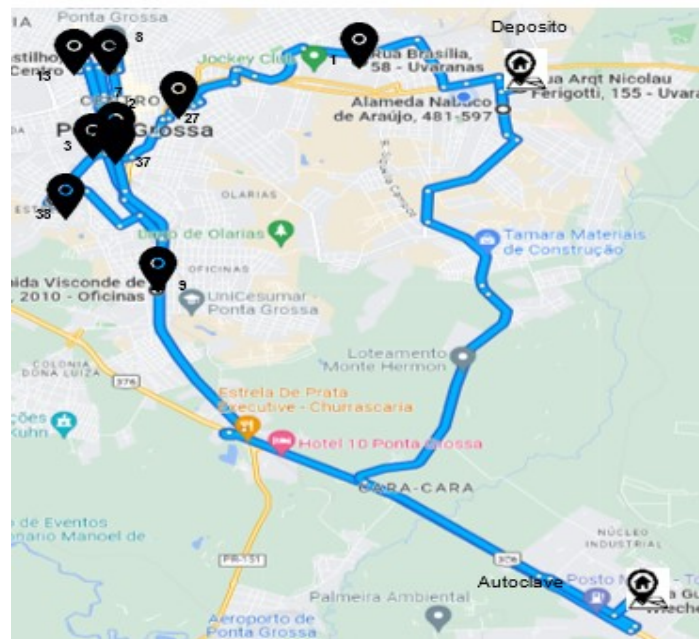


(e) Sexta-feira Rota 1 e Rota 2

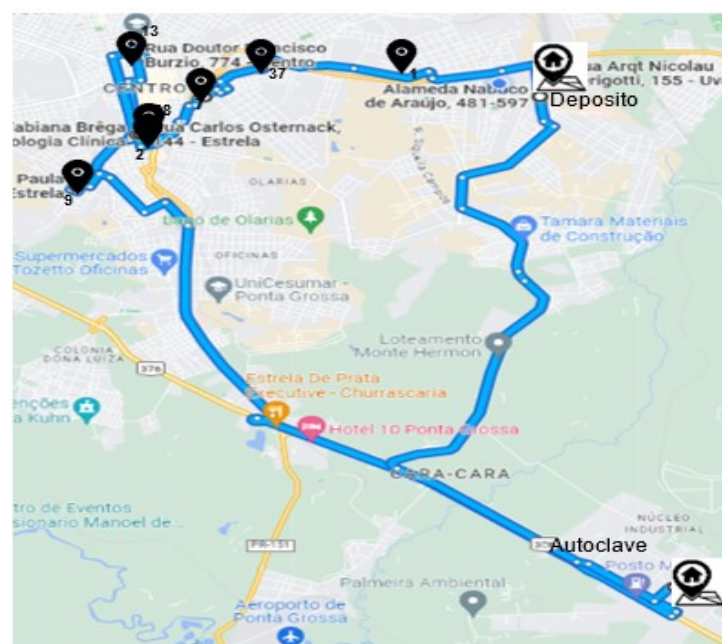
Fonte: Autoria própria, (2023)

Nos gráficos se observa as rotas percorridas pelo veículo destinado para esse tipo de cliente, com base nos resultados obtidos por meio do algoritmo *PSO*. O veículo em questão coleta cerca de 1.000 kg de resíduos por dia, visitando um total de 63 clientes. Vale ressaltar que, durante a primeira semana, a cidade de Carambeí é visitada na quinta-feira.

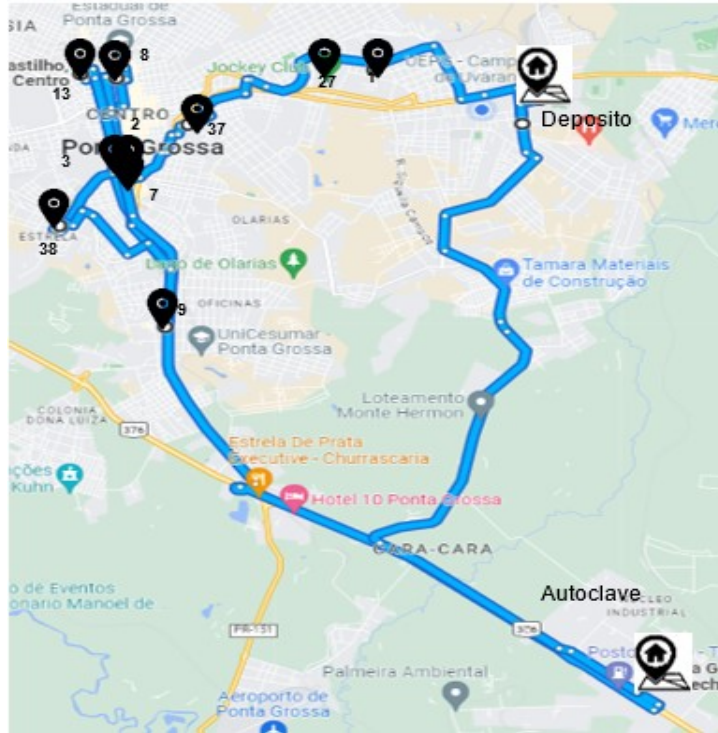
Figura 13 – Rotas dos clientes grandes – Primeira semana



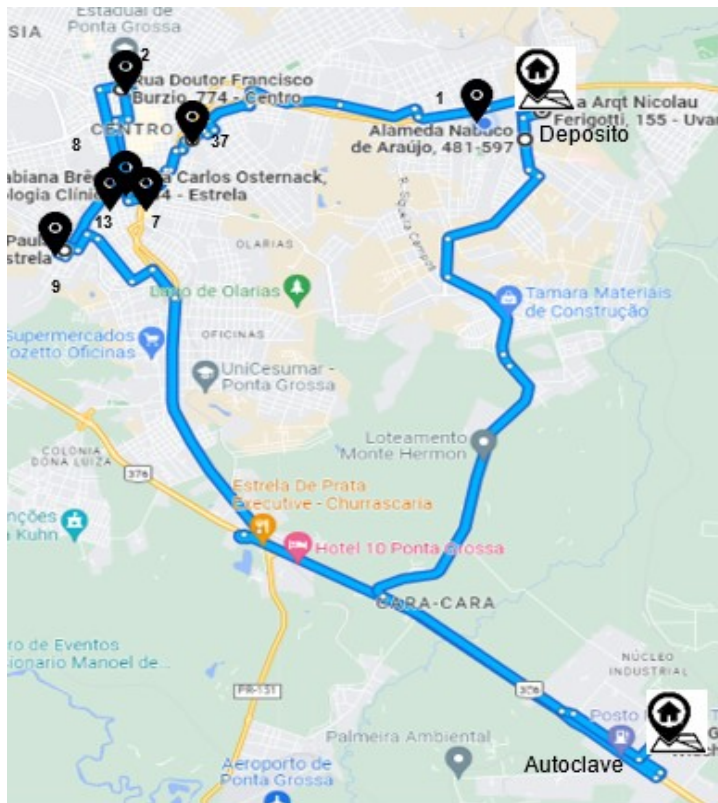
(a) Segunda-feira Rota 1



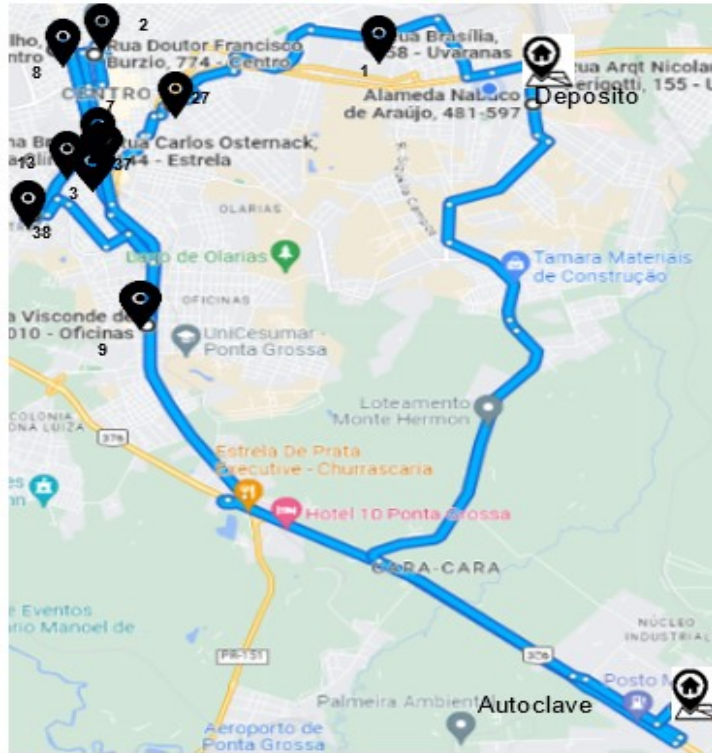
(b) Terça – feira Rota 1



(c) Quarta – feira Rota 1



(d) Quinta-feira Rota 1



(e) Sexta-feira Rota 1

Fonte: Autoria própria, (2023)

Ao analisar os clientes classificados como grandes, os quais incluem 10 estabelecimentos como hospitais e clínicas, foram delineadas as rotas percorridas para atender às suas demandas diárias. Esses clientes exigem visitas frequentes, que variam de três a cinco vezes por semana, devido à alta quantidade de resíduos gerados que precisam ser coletados.

É importante ressaltar que os clientes grandes possuem requisitos específicos para a coleta de resíduos, devido à natureza de suas atividades. Por esse motivo, torna-se imprescindível realizar visitas frequentes, a fim de atender às suas necessidades e garantir um serviço eficiente e adequado.

As figuras apresentadas permitem visualizar com clareza as rotas percorridas pelos dois tipos de clientes, identificando oportunidades de melhoria e otimização. Graças à abordagem integrada do algoritmo heurístico *PSO*, às distâncias otimizadas e à ferramenta Google Maps, é possível oferecer uma solução eficaz para a gestão de rotas e coleta mais eficiente. Os mapas das semanas 2, 3 e 4 estão disponíveis no Apêndice C.

Na próxima seção, serão apresentadas as discussões e análises referentes a esses dois algoritmos aplicados ao problema em estudo.

4.3 Discussões

No contexto do estudo de caso em uma empresa dedicada à coleta de resíduos de saúde, com o objetivo de minimizar a distância percorrida pelos veículos enquanto atende às demandas dos clientes, foram empregados os algoritmos *CW* e *PSO* como mecanismos de resolução do modelo proposto. Este modelo é embasado nos princípios da variante *PVRP* e engloba um total de 73 clientes localizados nas cidades de Ponta Grossa e Carambeí.

O algoritmo *CW* foi responsável pela construção eficiente das rotas a serem percorridas, enquanto o algoritmo *PSO* demonstrou uma melhoria significativa nas distâncias totais percorridas pelos veículos. Com base nos parâmetros definidos na Etapa 3, conforme exposto na Seção 3.3.2, é notável que o algoritmo *PSO* foi capaz de identificar as soluções mais vantajosas, resultando em rotas mais curtas e eficazes. Ambos os algoritmos consideraram as restrições relacionadas à capacidade, demanda e frequência de visitas, visando a minimização das distâncias percorridas pelos veículos.

As Tabelas 9 e 10 fornecem uma visão das distâncias totais percorridas por tipo de cliente e por semana. Esses resultados corroboram a eficiência tanto do algoritmo *CW* quanto do *PSO* na solução do problema de roteamento periódico proposto neste estudo.

Tabela 9 – Resultados por semana do algoritmo *CW* e *PSO* - Clientes pequenos

Semana	Distâncias totais percorridas (km)		Diferença das distâncias	
	Algoritmo		km	%
	<i>CW</i>	<i>PSO</i>		
1	445,21	421,00	24,21	5%
2	412,96	358,98	53,98	13%
3	414,00	368,99	45,01	11%
4	412,10	380,05	32,05	8%
Total	1.684,27	1.529,02	155,25	9%

Fonte: Autoria própria, (2023)

No caso dos clientes classificados como pequenos, foi contemplado um total de 63 pontos, cada um com demandas diferentes, e a análise foi realizada ao longo de quatro semanas. Conforme evidenciado na Tabela 9, é possível constatar que o algoritmo *CW* logrou construir rotas que apresentaram uma distância média de cerca

de 413 km por semana. As rotas iniciais são configuradas segundo as regras específicas do algoritmo, os quais agrupam os clientes levando em consideração suas demandas e a capacidade dos veículos, conforme mencionado por Sasikumar *et al.* (2009). Por outro lado, o algoritmo *PSO* gerou uma distância média de aproximadamente 375 km por semana, evidenciando sua eficiência enquanto algoritmo de otimização.

Ao analisar e comparar os resultados obtidos, destaca-se uma diminuição nas distâncias ao empregar o algoritmo *PSO* em comparação com o algoritmo *CW*, com uma média de redução de aproximadamente 39 km por semana, o que equivale a uma diminuição de 9%. Isso evidencia que o algoritmo *CW* desempenha um papel como heurística específica para roteamento, voltando para um conjunto determinado de clientes na construção das rotas, enquanto o *PSO* otimiza as distâncias de maneira mais específica para esse conjunto de clientes. Em relação aos clientes classificados como grandes, os resultados são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados por semana do algoritmo CW e PSO - Clientes grandes

Semana	Distâncias totais percorridas (km)		Diferença das distâncias	
	Algoritmo		km	%
	<i>CW</i>	<i>PSO</i>		
1	305,43	289,16	16,27	5%
2	299,16	278,20	20,96	7%
3	292,91	275,00	17,91	6%
4	298,23	278,20	20,03	7%
Total	1.195,73	1.120,56	75,17	6%

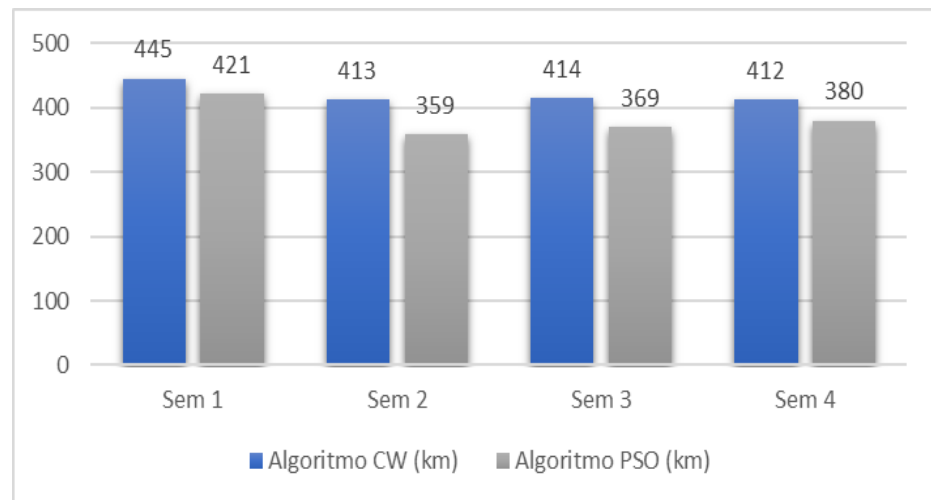
Fonte: Autoria própria, (2023)

Ao analisar a Tabela 10, é possível constatar que o algoritmo *PSO* se destaca no contexto dos clientes classificados como grandes, uma vez que conseguiu reduzir a distância total percorrida em cerca de 21 km por semana, em comparação com o algoritmo *CW*, representando uma redução de 6%. Esta diferença indica a maior eficiência do *PSO* na otimização das rotas, considerando as demandas dos clientes, a frequência das visitas e a capacidade dos veículos empregados para a prestação do serviço.

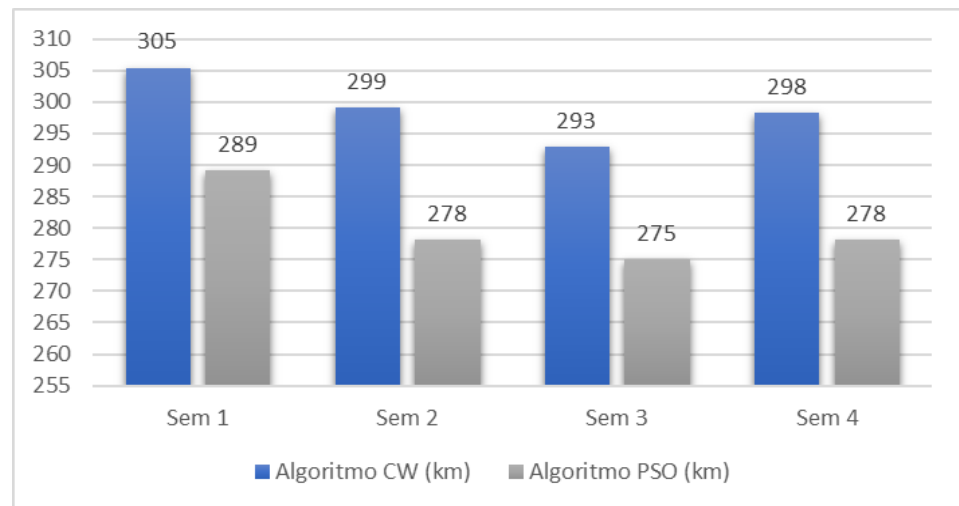
A Figura 14 ilustra os resultados obtidos ao se utilizar ambos os algoritmos, destacando a diferença nas distâncias em quilômetros decorrentes da aplicação de

cada algoritmo. A Figura descreve os resultados semanais, separando-os por categoria de cliente, proporcionando uma representação visual clara das melhorias obtidas com a adoção do algoritmo *PSO*. Essas constatações evidenciam que o algoritmo *PSO* efetivamente otimiza o roteamento para os clientes, proporcionando uma redução significativa na distância total percorrida.

Figura 14 – Comparação dos resultados de distância percorrida (km) entre os algoritmos *CW* e *PSO*



(a) Clientes pequenos



(b) Clientes grandes

Fonte: Autoria própria, (2023)

Com base nos registros das distâncias totais percorridas apresentados ao longo de quatro semanas, é possível calcular o valor total correspondente a um mês completo. A partir dos dados preliminares fornecidos pela empresa, procedeu-se à análise comparativa das distâncias percorridas pelos clientes, conforme explicitado na

Tabela 11, agrupadas de acordo com o tipo de cliente. Através dessa abordagem, torna-se possível analisar e contrastar as distâncias percorridas pelos algoritmos *CW* e *PSO* durante o transcorrer do mês completo.

Tabela 11 – Comparação da distância percorrida por tipo de algoritmo e tipo de cliente

Tipo de Cliente	Distância percorrida (km/mês)		
	Dados empresa	Algoritmo <i>CW</i>	Algoritmo <i>PSO</i>
Clientes pequenos	2.608	1.684	1.529
Clientes grandes	1.433	1.196	1.121

Fonte: Autoria própria, (2023)

Ao considerar as informações disponibilizadas pela empresa, foi verificado que os clientes pequenos são atendidos por um veículo que realiza coletas diárias. Através das especificações técnicas do modelo empregado, calculou-se uma estimativa de percurso mensal de aproximadamente 2.608 km. A análise dos resultados obtidos revelou uma notável redução de 35% na distância total percorrida mensalmente em comparação com o algoritmo *CW*, e uma redução de 41% quando comparado com o algoritmo *PSO*.

Da mesma forma, no caso dos clientes grandes, também foi possível constatar uma significativa redução nas distâncias percorridas. com a aplicação do algoritmo *CW*, observou-se uma diminuição de 17%, enquanto a utilização do algoritmo *PSO* resultou em uma redução de 22%, neste cenário, o veículo percorre aproximadamente 1.433 km por mês.

A notável redução nas distâncias percorridas traz consigo um conjunto de vantagens significativas, entre elas a diminuição dos gastos com combustível dos veículos e a redução do impacto ambiental. Isso se traduz em uma demanda menor por recursos energéticos e, por sua vez, em uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Esses aspectos ressaltam a relevância tanto dos algoritmos *CW* quanto do *PSO*, que demonstraram sua eficácia na otimização das rotas, culminando em benefícios de natureza econômica e ambiental para a empresa objeto de análise.

Ao adotar abordagens que resultam em menor consumo de combustível e menor impacto ambiental, a empresa não apenas pode economizar em custos operacionais, mas também contribui de forma positiva para a sustentabilidade e responsabilidade social. A otimização das rotas de coleta de resíduos de saúde, como

demonstrado por meio dos algoritmos *CW* e *PSO*, é um passo concreto em direção à eficiência operacional e à redução dos impactos negativos no meio ambiente.

O tempo de processamento dos algoritmos se apresenta como um fator relevante a ser considerado na escolha da abordagem, uma vez que sua eficiência repercute diretamente a agilidade com que os roteiros de coleta são otimizados. A partir dos resultados obtidos na etapa de testes realizados, é possível concluir que o algoritmo *PSO* manifesta um tempo de processamento inferior quando contrastado com o algoritmo *CW*. Enquanto o *CW* demanda aproximadamente 3.293 segundos para completar a execução do programa, o *PSO* realiza tal tarefa em somente 2.351 segundos. Ambos os algoritmos evidenciam tempos de processamento aceitáveis, entretanto, vale destacar que tais intervalos podem variar em função da quantidade de clientes a serem atendidos e das suas respectivas demandas de resíduos.

Além disso, o tempo de processamento dos algoritmos pode ser influenciado pela complexidade dos cenários analisados, englobando fatores como o número de clientes envolvidos e suas demandas particulares. A variação observada decorre da necessidade de considerar distintos elementos que contribuem para a definição das rotas de coleta, o que pode repercutir de forma direta sobre o tempo necessário para a realização das otimizações.

O próximo capítulo apresenta a conclusão definitiva deste estudo, juntamente com suas limitações, além de oferecer sugestões para possíveis trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusão

O propósito central deste estudo consistiu na formulação de um modelo matemático, que abordasse de maneira abrangente a problemática relacionada à coleta de resíduos de saúde na cidade de Ponta Grossa, situada no estado do Paraná, Brasil. Esse modelo foi concebido com o intuito de contemplar as especificidades inerentes ao processo em questão, visando primordialmente garantir a eficiência e a excelência na prestação de serviços aos clientes. Buscando, assim, a redução das distâncias percorridas pelos veículos coletores.

Para atingir o objetivo, foram conduzidas revisões sistemáticas da literatura. A primeira teve como foco a identificação da variante do *VRP* mais congruente com às características específicas do problema em estudo. Tal análise revelou que, tendo em vista as particularidades da coleta de resíduos de saúde na empresa em questão, a variante mais adequada é o Problema de Roteamento de Veículos Periódico (*PVRP*). A fundamentação para esta escolha reside na necessidade de cumprir uma programação predefinida, além de considerar as frequências de coleta necessárias para assegurar a qualidade do serviço e a preservação da saúde e do meio ambiente.

Por outro lado, realizou-se uma segunda análise bibliográfica com o propósito de identificar os métodos de solução mais eficazes para a variante escolhida, no caso, o *PVRP*. Dentro desse contexto, foi possível identificar o estado da arte dos métodos de solução exatos e heurísticos empregados no âmbito do *PVRP*. Levando em consideração a literatura existente e as características intrínsecas ao processo de coleta de resíduos, optou-se pela seleção das heurísticas como método de resolução, fundamentada na capacidade em oferecer uma alternativa viável para encontrar soluções de boa qualidade em um intervalo de tempo razoável. Além disso, as heurísticas demonstram a habilidade de lidar com grandes instâncias, ou seja, que envolvem um amplo número de variáveis.

Neste trabalho, empregamos dois algoritmos para a resolução do modelo proposto: o *Clarke and Wright (CW)* como algoritmo de construção e *Particle Swarm Optimization (PSO)* como algoritmo de otimização. A utilização desses dois algoritmos tem por finalidade explorar as vantagens intrínsecas de cada um, permitindo assim a realização de uma comparação entre eles, com o propósito de avaliar a eficácia de ambos em consonância com as informações específicas da empresa abordada.

Através deste enfoque comparativo, pretendemos identificar qual abordagem se adapta de maneira mais efetiva às particularidades do cenário empresarial analisado.

Após determinar o *PVRP* e a seleção dos algoritmos de solução, procedeu-se à estruturação de um modelo matemático, baseado em dados da literatura, que definiu os parâmetros, variáveis e restrições, incorporando também informações fornecidas pela empresa. Em seguida, foram conduzidos testes computacionais utilizando o ambiente *Spyder* e a linguagem de programação *Python*, para avaliar o desempenho dos algoritmos implementados. Esses testes levaram em consideração o número total de clientes, abrangendo tanto aqueles localizados na cidade de Ponta Grossa quanto em Carambeí.

Os resultados obtidos evidenciaram impactos significativos na eficiência do sistema de coleta de resíduos ao empregar os algoritmos *CW* e *PSO*. Nota-se que os clientes foram categorizados em dois grupos distintos, os grandes e pequenos, com base na sua demanda de resíduos a serem coletados, fator determinante para a frequência das visitas de coleta para cada cliente.

No caso dos clientes pequenos, observou-se uma redução notável de 31% na distância total percorrida mensalmente ao utilizar o algoritmo *CW*, e uma redução de 41% ao aplicar o algoritmo *PSO*. No mesmo sentido, ao analisar os clientes grandes, foi evidenciada uma redução de 17% na distância total percorrida mensalmente com a utilização do algoritmo *CW* enquanto um incremento adicional de eficiência de 22% foi atingido ao empregar o *PSO*. Tais resultados são comparados diretamente com os dados iniciais fornecidos pela empresa, evidenciando as melhorias alcançadas por meio da implementação dos algoritmos propostos.

Pode-se concluir de maneira assertiva que o modelo matemático, resolvido por meio dos algoritmos *CW* e *PSO*, demonstrou um desempenho eficaz, gerando resultados otimizados. Esses aspectos destacam a notável eficácia dos algoritmos adotados neste estudo na otimização das rotas, com a significativa redução das distâncias percorridas pelos veículos, traduzindo-se diretamente em uma diminuição dos custos associados ao combustível e um impacto ambiental mitigado.

A mencionada redução nas distâncias percorridas resulta em uma menor necessidade de consumo de combustível, acarretando uma diminuição das emissões de gases de efeito estufa. Este decréscimo no consumo de combustível não apenas contribui para a sustentabilidade ambiental, mas também desempenha um papel

fundamental na atenuação das mudanças climáticas, alinhando-se com as metas globais de redução das pegadas de carbono.

Outro aspecto de notável relevância a ser destacado reside no fato de que, embora tenha sido empregado como estudo de caso o contexto dos resíduos de saúde de uma empresa sediada em Ponta Grossa, o modelo proposto revela a seu potencial aplicabilidade em diversos outros domínios de atuação, desde que os dados de entrada apropriados sejam empregados. Vale ressaltar que a precisão e realismo desses dados desempenham um papel fundamental na eficácia do modelo quando em sua aplicação.

Na seção subsequente, serão abordadas de maneira detalhada as limitações identificadas bem como as sugestões que se vislumbram para pesquisas futuras a partir deste estudo.

5.2 Limitações do estudo e sugestões para trabalhos futuros

No que concerne às limitações inerentes a este estudo, é pertinente ressaltar a importância de incorporar novos parâmetros e restrições para a geração de cenários adicionais, a fim de conferir um grau máximo de realismo ao modelo, especialmente considerando fatores de ordem econômica e social. Por exemplo, é imperativo contemplar os custos relacionados ao transporte da coleta de resíduos, bem como os tempos de espera inerentes ao processo de coleta, que constituem variáveis cruciais a serem consideradas.

Em relação a trabalhos futuros, recomenda-se a exploração de outras heurísticas ou metaheurísticas para a otimização de rotas, e a avaliação de possíveis discrepâncias nos resultados obtidos. Além disso, sugere-se aprofundar a análise de custos e de outras restrições pertinentes, como a manutenção dos veículos e os tempos de deslocamento. Tais acréscimos contribuirão para uma abordagem mais abrangente na resolução do problema, levando em conta diferentes fatores que impactam a eficiência e a viabilidade do sistema de coleta de resíduos de saúde.

Além disso, é válido explorar outras variantes do *VRP* que possam ter relevância no contexto da coleta de resíduos de saúde. Por exemplo, considerar janelas de tempo restritas para a realização das coletas ou incorporar a capacidade variável de carga dos veículos. A investigação dessas variantes adicionais proporcionará uma compreensão mais completa das complexidades subjacentes ao problema e permitirá a criação de soluções mais adaptadas à realidade.

Uma outra sugestão de aprimoramento é a implementação de uma interface ou aplicativo que permita à empresa inserir os dados diretamente, com o objetivo de minimizar e padronizar o tempo necessário para a formulação das rotas necessárias. Essa medida conferiria maior agilidade e simplicidade na utilização do modelo, oferecendo suporte à empresa no planejamento e na tomada de decisões relacionadas à coleta de resíduos de saúde.

Todas essas sugestões visam enriquecer e expandir o estudo, promovendo uma abordagem mais completa e precisa na resolução do desafio de roteirização associado à coleta de resíduos de saúde.

REFERÊNCIAS

ABBATECOLA, Lorenzo et al. A decision support approach for postal delivery and waste collection services. **IEEE Transactions on automation science and engineering**, v. 13, n. 4, p. 1458-1470, 2016.

ABRELPE (Brasil) (org.). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>. Acesso em: 15 maio 2023.

ABRELPE (Brasil) (org.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: panorama 2021**. 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 16 maio 2023.

ABRELPE (Brasil) (org.). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil: panorama 2022**. 2022. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: 20 maio 2023.

AGUSHAKA, Jeffrey O.; EZUGWU, Absalom E. Initialisation approaches for population-based metaheuristic algorithms: a comprehensive review. **Applied Sciences**, v. 12, n. 2, p. 896, 2022.

AKBARPOUR, Navid *et al.* An innovative waste management system in a smart city under stochastic optimization using vehicle routing problem. **Soft Computing**, v. 25, p. 6707-6727, 2021.

ALIAHMADI, Seyed Zeinab; BARZINPOUR, Farnaz; PISHVAEE, Mir Saman. A fuzzy optimization approach to the capacitated node-routing problem for municipal solid waste collection with multiple tours: A case study. **Waste Management & Research**, v. 38, n. 3, p. 279-290, 2019.

ALIAHMADI, Seyed Zeinab; BARZINPOUR, Farnaz; PISHVAEE, Mir Saman. A novel bi-objective credibility-based fuzzy model for municipal waste collection with hard time windows. **Journal of Cleaner Production**, v. 296, p. 126364, 2021.

ALMEIDA, André Luís Barroso; LIMA, Joubert de Castro; CARVALHO, Marco Antonio M. Systematic literature review on parallel trajectory-based metaheuristics. **ACM Computing Surveys**, v. 55, n. 8, p. 1-34, 2022.

AMAL, Louati; SON, Le Hoang; CHABCHOUB, Habib. SGA: spatial GIS-based genetic algorithm for route optimization of municipal solid waste collection. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, p. 27569-27582, 2018.

ANGELELLI, Enrico; SPERANZA, Maria Grazia. The periodic vehicle routing problem with intermediate facilities. **European journal of Operational research**, v. 137, n. 2, p. 233-247, 2002.

BABAE TIRKOLAE, Erfan; AYDIN, Nadi Serhan. A sustainable medical waste collection and transportation model for pandemics. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 1_suppl, p. 34-44, 2021.

BELTRAMI, Edward J.; BODIN, Lawrence D. Networks and vehicle routing for municipal waste collection. **Networks**, v. 4, n. 1, p. 65-94, 1974.

BENJAMIN, Aida Mauziah; BEASLEY, John E. Metaheuristics for the waste collection vehicle routing problem with time windows, driver rest period and multiple disposal facilities. **Computers & Operations Research**, v. 37, n. 12, p. 2270-2280, 2010.

BENJAMIN, Aida Mauziah; BEASLEY, John E. Metaheuristics with disposal facility positioning for the waste collection *VRP* with time windows. **Optimization Letters**, v. 7, p. 1433-1449, 2013.

BIANCHESSI, Nicola; RIGHINI, Giovanni. Heuristic algorithms for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 2, p. 578-594, 2007.

BING, Xiaoyun *et al.* Vehicle routing for the eco-efficient collection of household plastic waste. **Waste management**, v. 34, n. 4, p. 719-729, 2014.

BRAEKERS, Kris; RAMAEKERS, Katrien; VAN NIEUWENHUYSE, Inneke. The vehicle routing problem: State of the art classification and review. **Computers & industrial engineering**, v. 99, p. 300-313, 2016.

BRASIL, CF do B. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). **Brazilian Pharmacopeia**, 5a ed, 2010.

BURDUK, Anna *et al.* Waste Management with the Use of Heuristic Algorithms and Internet of Things Technology. **Sensors**, v. 22, n. 22, p. 8786, 2022.

CACCHIANI, Valentina; HEMMELMAYR, Vera C.; TRICOIRE, Fabien. A set-covering based heuristic algorithm for the periodic vehicle routing problem. **Discrete Applied Mathematics**, v. 163, p. 53-64, 2014.

CANTU-FUNES, Roberto; SALAZAR-AGUILAR, M. Angélica; BOYER, Vincent. Multi-depot periodic vehicle routing problem with due dates and time windows. **Journal of the operational research society**, v. 69, n. 2, p. 296-306, 2018.

CHANG, Ni-Bin; WEI, Y. L. Comparative study between the heuristic algorithm and the optimization technique for vehicle routing and scheduling in a solid waste collection system. **Civil Engineering and Environmental Systems**, v. 19, n. 1, p. 41-65, 2002.

CHAUHAN, Ankur; JAKHAR, Suresh Kumar; CHAUHAN, Chetna. The interplay of circular economy with industry 4.0 enabled smart city drivers of healthcare waste disposal. **Journal of cleaner production**, v. 279, p. 123854, 2021.

CHEN, Binhui *et al.* A variable neighborhood search algorithm with reinforcement learning for a real-life periodic vehicle routing problem with time windows and open routes. **RAIRO-Operations Research**, v. 54, n. 5, p. 1467-1494, 2020.

CHEN, Ruey-Maw; SHEN, Yin-Mou; HONG, Wei-Zhi. Neural-like encoding particle swarm optimization for periodic vehicle routing problems. **Expert Systems with Applications**, v. 138, p. 112833, 2019.

CORDEAU, Jean-François; GENDREAU, Michel; LAPORTE, Gilbert. A tabu search heuristic for periodic and multi-depot vehicle routing problems. **Networks: An International Journal**, v. 30, n. 2, p. 105-119, 1997.

DANTZIG, George B.; RAMSER, John H. The truck dispatching problem. **Management science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DARWIN, Charles. **A origem das espécies**. 2009.

DE BRUECKER, Philippe *et al.* A model enhancement approach for optimizing the integrated shift scheduling and vehicle routing problem in waste collection. **European Journal of Operational Research**, v. 266, n. 1, p. 278-290, 2018.

DERECI, Ufuk; KARABEKMEZ, Muhammed Erkan. The applications of multiple route optimization heuristics and meta-heuristic algorithms to solid waste transportation: A case study in Turkey. **Decision Analytics Journal**, v. 4, p. 100113, 2022.

DOKEROGLU, Tansel *et al.* A survey on new generation metaheuristic algorithms. **Computers & Industrial Engineering**, v. 137, p. 106040, 2019.

DREXL, Michael. Rich vehicle routing in theory and practice. **Logistics Research**, v. 5, p. 47-63, 2012.

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

ERDEM, Mehmet. Designing a sustainable logistics network for hazardous medical waste collection a case study in COVID-19 pandemic. **Journal of Cleaner Production**, v. 376, p. 134192, 2022.

ERDEM, Mehmet. Optimisation of sustainable urban recycling waste collection and routing with heterogeneous electric vehicles. **Sustainable Cities and Society**, v. 80, p. 103785, 2022.

EREN, Emre; TUZKAYA, Umut Rifat. Safe distance-based vehicle routing problem: Medical waste collection case study in COVID-19 pandemic. **Computers & Industrial Engineering**, v. 157, p. 107328, 2021.

EXPOSITO-MARQUEZ, Airam *et al.* Greedy randomized adaptive search procedure to design waste collection routes in La Palma. **Computers & Industrial Engineering**, v. 137, p. 106047, 2019.

FLOOD, Merrill M. The traveling-salesman problem. **Operations research**, v. 4, n. 1, p. 61-75, 1956.

FREY, Christian MM *et al.* The vehicle routing problem with time windows and flexible delivery locations. **European Journal of Operational Research**, v. 308, n. 3, p. 1142-1159, 2023.

GANESH, K.; NALLATHAMBI, A. Sam; NARENDRAN, T. T. Variants, solution approaches and applications for vehicle routing problems in supply chain: agile framework and comprehensive review. **International Journal of Agile Systems and Management**, v. 2, n. 1, p. 50-75, 2007.

GAO, Jiajing *et al.* Routing optimisation of urban medical waste recycling network considering differentiated collection strategy and time windows. **Scientific Programming**, v. 2021, p. 1-11, 2021.

GEETHA, Shanmugam; VANATHI, P. T.; POONTHALIR, Ganesan. Metaheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem. **Applied Artificial Intelligence**, v. 26, n. 9, p. 878-901, 2012.

GENDREAU, Michel; LAPORTE, Gilbert; POTVIN, Jean-Yves. Metaheuristics for the capacitated *VRP*. In: The vehicle routing problem. **Society for Industrial and Applied Mathematics**, 2002. p. 129-154.

GHANNADPOUR, Seyed Farid; ZANDIEH, Fatemeh; ESMAEILI, Faraneh. Optimizing triple bottom-line objectives for sustainable health-care waste collection and routing by a self-adaptive evolutionary algorithm: A case study from tehran province in Iran. **Journal of cleaner production**, v. 287, p. 125010, 2021.

GLÄSER, Sina; STÜCKEN, Mareike. Introduction of an underground waste container system—model and solution approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 295, n. 2, p. 675-689, 2021.

GREENHEALTH, Practice. **WASTE Understand hospital waste streams, how to measure them, and how to reduce waste at your facility**. 2020. Disponível em: <https://practicegreenhealth.org/topics/waste/waste-0>. Acesso em: 30 maio 2023.

HASHEMI-AMIRI, Omid *et al.* An allocation-routing optimization model for integrated solid waste management. **Expert Systems with Applications**, v. 227, p. 120364, 2023.

HASSANPOUR, Saeed Tasouji *et al.* Infectious waste management during a pandemic: A stochastic location-routing problem with chance-constrained time windows. **Computers & Industrial Engineering**, v. 177, p. 109066, 2023.

HAUGE, Kristian *et al.* A hybrid column generation approach for an industrial waste collection routing problem. **Computers & Industrial Engineering**, v. 71, p. 10-20, 2014.

HEMMELMAYR, Vera *et al.* A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. **Journal of Heuristics**, v. 19, p. 129-156, 2011.

HERNANDEZ, Florent; GENDREAU, Michel; POTVIN, Jean-Yves. Heuristics for tactical time slot management: a periodic vehicle routing problem view. **International transactions in operational research**, v. 24, n. 6, p. 1233-1252, 2017.

HUANG, Nan *et al.* The multi-trip vehicle routing problem with time windows and unloading queue at depot. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 152, p. 102370, 2021.

JOURDAN, Laetitia; BASSEUR, Matthieu; TALBI, E.-G. Hybridizing exact methods and metaheuristics: A taxonomy. **European Journal of Operational Research**, v. 199, n. 3, p. 620-629, 2009.

KAYA, Serkan. A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm with local search for the problem of municipal solid waste collection: a real-life example. **Neural Computing and Applications**, v. 35, n. 9, p. 7107-7124, 2023.

KENNY, Christina; PRIYADARSHINI, Anushree. Review of current healthcare waste management methods and their effect on global health. In: **Healthcare. MDPI**, 2021. p. 284.

KHAN, Muhammad Kamran *et al.* Impact of globalization, economic factors and energy consumption on CO2 emissions in Pakistan. **Science of the total environment**, v. 688, p. 424-436, 2019.

KONSTANTAKOPOULOS, Grigorios D.; GAYIALIS, Sotiris P.; KECHAGIAS, Evripidis P. Vehicle routing problem and related algorithms for logistics distribution: a literature review and classification. **Operational research**, p. 1-30, 2020.

KURZ, Andrea; ZÄPFEL, Günther. Modeling cost-delivery trade-offs for distribution logistics by a generalized *PVRP* model. **Journal of Business Economics**, v. 83, p. 705-726, 2013.

LAN, Wenxing *et al.* Region-focused memetic algorithms with smart initialization for real-world large-scale waste collection problems. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 26, n. 4, p. 704-718, 2022.

LANDRIGAN, Philip J. *et al.* The Lancet Commission on pollution and health. **The lancet**, v. 391, n. 10119, p. 462-512, 2018.

LE HOANG, S. O. N. Optimizing municipal solid waste collection using chaotic particle swarm optimization in GIS based environments: a case study at Danang city, Vietnam. **Expert systems with applications**, v. 41, n. 18, p. 8062-8074, 2014.

LI, Hongqi *et al.* The vehicle flow formulation and savings-based algorithm for the rollon-rolloff vehicle routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 257, n. 3, p. 859-869, 2017.

LÓPEZ-SÁNCHEZ, A. D. *et al.* A multiobjective GRASP-VND algorithm to solve the waste collection problem. **International Transactions in Operational Research**, v. 25, n. 2, p. 545-567, 2018.

MAHDAVI, Leila; MANSOUR, Saeed; SAJADIEH, Mohsen Sheikh. Sustainable multi-trip periodic redesign-routing model for municipal solid waste collection network: the case study of Tehran. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 24, p. 35944-35963, 2022.

MARKOV, Iliya; VARONE, Sacha; BIERLAIRE, Michel. Integrating a heterogeneous fixed fleet and a flexible assignment of destination depots in the waste collection *VRP* with intermediate facilities. **Transportation research part B: methodological**, v. 84, p. 256-273, 2016.

MARSEGLIA, G. *et al.* A heuristic for the deployment of collecting routes for urban recycle stations (eco-points). **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 82, p. 101222, 2022.

MARTINS, Mariana Alves *et al.* Generation of infectious waste during the COVID-19 pandemic: The case of a Brazilian hospital. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 10, p. 1245-1255, 2021.

MCKINSEY & COMPANY *et al.* COVID-19 and gender equality: Countering the regressive effects. 2020.

MIRANDA, Pablo A. *et al.* A novel methodology for designing a household waste collection system for insular zones. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 77, p. 227-247, 2015.

MOHAMED, Fatma *et al.* Highly Efficient Photocatalyst Fabricated from the Chemical Recycling of Iron Waste and Natural Zeolite for Super Dye Degradation. **Nanomaterials**, v. 12, n. 2, p. 235, 2022.

MORA, Cristina *et al.* Environmental and economic assessment for the optimal configuration of a sustainable solid waste collection system: a 'kerbside' case study. **Production planning & control**, v. 25, n. 9, p. 737-761, 2014.

MOSALLANEZHAD, Behzad *et al.* Disaster relief supply chain design for personal protection equipment during the COVID-19 pandemic. **Applied Soft Computing**, v. 112, p. 107809, 2021.

MOURGAYA, M.; VANDERBECK, François. Column generation-based heuristic for tactical planning in multi-period vehicle routing. **European Journal of Operational Research**, v. 183, n. 3, p. 1028-1041, 2007.

NAIR, D. J. *et al.* Scheduling and routing models for food rescue and delivery operations. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 63, p. 18-32, 2018.

NAIR, Divya Jayakumar *et al.* Food rescue and delivery: Heuristic algorithm for periodic unpaired pickup and delivery vehicle routing problem. **Transportation Research Record**, v. 2548, n. 1, p. 81-89, 2016.

- NEUMANN, Frank; WITT, Carsten. Bioinspired computation in combinatorial optimization: Algorithms and their computational complexity. In: **Proceedings of the 15th annual conference companion on Genetic and evolutionary computation**. 2013. p. 567-590.
- NEVES, Arthur Couto *et al.* Analysis of healthcare waste management in hospitals of Belo Horizonte, Brazil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 60, p. 90601-90614, 2022.
- NI, Qiuping; TANG, Yuanxiang. A Bibliometric Visualized Analysis and Classification of Vehicle Routing Problem Research. **Sustainability**, v. 15, n. 9, p. 7394, 2023.
- NIRANJANI, G.; UMAMAHESWARI, K. Sustainable Waste Collection Vehicle Routing Problem for COVID-19. **Intelligent Automation & Soft Computing**, v. 33, n. 1, 2022.
- NOROUZI, Narges; SADEGH-AMALNICK, Mohsen; ALINAGHIYAN, Mehdi. Evaluating of the particle swarm optimization in a periodic vehicle routing problem. **Measurement**, v. 62, p. 162-169, 2015.
- OMIDVAR, Mohammad Nabi; LI, Xiaodong; YAO, Xin. A review of population-based metaheuristics for large-scale black-box global optimization—Part I. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 26, n. 5, p. 802-822, 2021.
- PADMANABHAN, K. K.; BARIK, Debabrata. Health hazards of medical waste and its disposal. In: Energy from toxic organic waste for heat and power generation. **Woodhead Publishing**, 2019. p. 99-118.
- PAGE, Matthew J. *et al.* The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. **International journal of surgery**, v. 88, p. 105906, 2021.
- PASHA, Junayed *et al.* Exact and metaheuristic algorithms for the vehicle routing problem with a factory-in-a-box in multi-objective settings. **Advanced Engineering Informatics**, v. 52, p. 101623, 2022.
- PICHPIBUL, Tantikorn; KAWTUMMACHAI, Ruengsak. An improved Clarke and Wright savings algorithm for the capacitated vehicle routing problem. **Science Asia**, v. 38, n. 3, p. 307-318, 2012.
- PILLAC, Victor *et al.* A review of dynamic vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 225, n. 1, p. 1-11, 2013.

PISINGER, David; ROPKE, Stefan. A general heuristic for vehicle routing problems. **Computers & operations research**, v. 34, n. 8, p. 2403-2435, 2007.

PRODHON, Caroline. A hybrid evolutionary algorithm for the periodic location-routing problem. **European Journal of Operational Research**, v. 210, n. 2, p. 204-212, 2011.

QI, Mingyao *et al.* Robust periodic vehicle routing problem with service time uncertainty. In: 2018 **IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM)**. IEEE, 2018. p. 1431-1435.

QIAO, Qingqing *et al.* Optimization of a capacitated vehicle routing problem for sustainable municipal solid waste collection management using the *PSO-TS* algorithm. **International journal of environmental research and public health**, v. 17, n. 6, p. 2163, 2020.

RAHIMI-VAHED, Alireza *et al.* Fleet-sizing for multi-depot and periodic vehicle routing problems using a modular heuristic algorithm. **Computers & Operations Research**, v. 53, p. 9-23, 2015.

RAHMAN, Md Ashikur *et al.* Nature-inspired metaheuristic techniques for combinatorial optimization problems: overview and recent advances. **Mathematics**, v. 9, n. 20, p. 2633, 2021.

RAHMANIFAR, Golman *et al.* Heuristic approaches to address vehicle routing problem in the lot-based waste management system. **Expert Systems with Applications**, v. 220, p. 119708, 2023.

RAMOS, Tânia Rodrigues Pereira; GOMES, Maria Isabel; BARBOSA-PÓVOA, Ana Paula. Planning a sustainable reverse logistics system: Balancing costs with environmental and social concerns. **Omega**, v. 48, p. 60-74, 2014.

RAUTELA, Rahul *et al.* E-waste management and its effects on the environment and human health. **Science of the Total Environment**, v. 773, p. 145623, 2021.

REZAEI, Babak *et al.* Combining genetic local search into a multi-population Imperialist Competitive Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem. **Applied Soft Computing**, v. 142, p. 110309, 2023.

RODRÍGUEZ-MARTÍN, Inmaculada; SALAZAR-GONZÁLEZ, Juan-José; YAMAN, Hande. The periodic vehicle routing problem with driver consistency. **European Journal of Operational Research**, v. 273, n. 2, p. 575-584, 2019.

- ROTHENBÄCHER, Ann-Kathrin. Branch-and-price-and-cut for the periodic vehicle routing problem with flexible schedule structures. **Transportation Science**, v. 53, n. 3, p. 850-866, 2019.
- SABET, Saba; FAROOQ, Bilal. Green Vehicle Routing Problem: State of the Art and Future Directions. **IEEE Access**, 2022.
- SALEHI-AMIRI, Amirhossein *et al.* Designing an effective two-stage, sustainable, and IoT based waste management system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 157, p. 112031, 2022.
- SANGKHAM, Sarawut. Face mask and medical waste disposal during the novel COVID-19 pandemic in Asia. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 2, p. 100052, 2020.
- SASIKUMAR, P.; KANNAN, Govindan; HAQ, A. Noorul. A heuristic based approach to vehicle routing model for Third Party Reverse Logistics provider. **International Journal of Services Technology and Management**, v. 12, n. 1, p. 106-125, 2009.
- SAZVAR, Zeinab *et al.* Designing a sustainable closed-loop pharmaceutical supply chain in a competitive market considering demand uncertainty, manufacturer's brand and waste management. **Annals of Operations Research**, p. 1-32, 2021.
- SHIH, Li-Hsing; CHANG, Hua-Chi. A routing and scheduling system for infectious waste collection. **Environmental Modeling & Assessment**, v. 6, p. 261-269, 2001.
- SHIH, Li-Hsing; LIN, Yung-Teh. Optimal routing for infectious waste collection. **Journal of Environmental Engineering**, v. 125, n. 5, p. 479-484, 1999.
- SULEMANA, Alhassan *et al.* Optimal routing of solid waste collection trucks: a review of methods. **Journal of Engineering**, v. 2018, 2018.
- TAN, Shi-Yi; YEH, Wei-Chang. The vehicle routing problem: State-of-the-art classification and review. **Applied Sciences**, v. 11, n. 21, p. 10295, 2021.
- TASLIMI, Masoumeh; BATTI, Rajan; KWON, Changhyun. Medical waste collection considering transportation and storage risk. **Computers & Operations Research**, v. 120, p. 104966, 2020.
- TOMITAGAWA, Koki *et al.* Performance Measurement of Energy Optimal Path Finding for Waste Collection Robot Using ACO Algorithm. **IEEE Access**, v. 10, p. 117261-117272, 2022.

VAN ENGELAND, Jens; BELIËN, Jeroen. Tactical waste collection: column generation and mixed integer programming-based heuristics. **OR Spectrum**, v. 43, n. 1, p. 89-126, 2021.

WANG, Yuan *et al.* An improved ant colony optimization algorithm to the periodic vehicle routing problem with time window and service choice. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 55, p. 100675, 2020.

WEI, Qu *et al.* An artificial bee colony-based hybrid approach for waste collection problem with midway disposal pattern. **Applied Soft Computing**, v. 76, p. 629-637, 2019.

WIN, Ei Mon *et al.* Healthcare waste management at primary health centres in Mon State, Myanmar: The comparisons between hospital and non-hospital type primary health centres. **Nagoya Journal of Medical Science**, v. 81, n. 1, p. 81, 2019.

WORLD HEALTH ORGANIZATION *et al.* Global analysis of healthcare waste in the context of COVID-19: status, impacts and recommendations. **In: Global analysis of healthcare waste in the context of COVID-19: status, impacts and recommendations**. 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Health-care waste**. Disponível em: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/health-care-waste>. Acesso em: 26 maio 2023.

YAO, Baozhen *et al.* Artificial bee colony algorithm with scanning strategy for the periodic vehicle routing problem. **Simulation**, v. 89, n. 6, p. 762-770, 2013.

YAO, Linglan *et al.* The integrated design and optimization of a WEEE collection network in Shanghai, China. **Waste management & research**, v. 31, n. 9, p. 910-919, 2013.

ZAMPARAS, M. *et al.* Medical waste management and environmental assessment in the Rio University Hospital, Western Greece. **Sustainable Chemistry and Pharmacy**, v. 13, p. 100163, 2019.

ZHANG, Haifei *et al.* Review of vehicle routing problems: Models, classification and solving algorithms. **Archives of Computational Methods in Engineering**, p. 1-27, 2021.

ZHANG, Wanting *et al.* Variable Neighborhood Search for Multi-Cycle Medical Waste Recycling Vehicle Routing Problem with Time Windows. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 19, p. 12887, 2022.

APÊNDICE A - Questionário de diagnóstico

Dados Resíduos de Saúde

1. Quais são os veículos e suas capacidades disponíveis para a coleta de resíduos sólidos de saúde?

Identificação do tipo de veículo	Quantidade (Unidades)	Capacidade (kg)	Observações

2. Quais são as quantidades coletadas, a frequência e o gasto médio por veículo?

Identificação do tipo de veículo	Número de viagens por mês	Quantidade de resíduos coletados diariamente (toneladas)	Número de dias da semana que realiza a coleta	Gasto médio em combustível (R\$/mês)	Gasto médio de manutenção (R\$/mês)

3. Quais são as coordenadas de localização dos clientes?

Nome ou código do cliente	Pequeno Gerador	Grande Gerador	Coordenadas		Cantidad de visitas pela semana
			X (latitude)	Y (longitude)	

4. Quais são as coordenadas de localização da garagem dos veículos?

5. Quais são as coordenadas de localização dos pontos de destino final?
(Autoclave)

6. Vocês realizão a separação por tipo de resíduo? por exemplo perigoso ou não perigoso

APÊNDICE B - Quantidade de resíduos a serem coletados por semana e por tipo de cliente

Quantidade de resíduos- Clientes grandes

SEMANA 1					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
7	103	90	76	98	70
9	100	90	81	85	100
1	120	98	93	91	98
37	135	108	101	98	101
2	130	97	91	103	97
13	114	109	65	94	105
8	123	108	78	101	109
SEMANA 2					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
3	116	101	96	91	93
7	142		118		60
9	126	107	94	100	98
1	76	104	79	113	78
27	73		125		122
37	120	103	110	92	114
2	89	81	102	97	85
13	87	80	89	88	96
8	94		108		117
38	85		123		109
SEMANA 3					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
3	75		127		113
7	98	81	108	117	50
9	74		118		127
1	108	107	91	69	87
27	60		104		154
37	106	76	99	63	103
2	90	120	96	89	75
13	116	84	80	100	96
8	98	116	60	89	82
38	74		111		134
SEMANA 4					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
3	110	90	85	101	96
7	144		119		57
9	98	101	65	98	86
1	102	106	90	108	83
27	62		129		121
37	89	98	100	96	87
2	108	98	68	76	99
13	101	99	94	100	97
8	64		138		116
38	65		129		123

Quantidade de resíduos- Clientes pequenos

SEMANA 1					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
4					93
10			69		51
5		92			
15			45		72
29					88
30	68		40		
31	59		45		
32	75				
43	76				
45	85				
70	84				
71	93				
72	50		53		
6			58		54
11					94
12			46		74
16	71		30		
17					94
18			53		
19		80			
20		71			
21		79			
22		65			
23		82			
24	84		48		
25		56			
26	30		50		70
28	55		52		
33		68			
34		76			
36			68		33
39		99			
40		87			
44		71			
46	55		47		
73			61		
35		71			
41	35		66		38
42			65		42
14					99
47				53	
48				50	
49				42	
50				40	
51				33	
52				51	
53				38	
54				54	
55				51	
56				42	
57				46	

SEMANA 1					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
58				49	
59				28	
60				33	
61				55	
62				48	
63				53	
64				52	
65				44	
66				32	
67				40	
68				32	
69				31	

SEMANA 2					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
4					99
10			61		53
5		76		46	
15			65		54
29		71		57	
30		72		51	
31		78		47	
32		78		52	
43		77		48	
45	147				
70	149				
71	169				
72		83		45	
6			71		55
11					100
12			69		44
16	91		58		
17					99
18			73		
19		98			
20		100			
21		96			
22		97			
23				99	
24	92		53		
25				94	
26	51		72		62
28	65		66		

SEMANA 2					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
33				95	
34				98	
36			70		51
39				90	
40				94	
44			75		
46	97		54		
73			82		
35				84	
41	59		65		61
42			65		60
14					97

SEMANA 3					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
4					166
10			128		104
5		113		86	
15			84		111
29		111		49	
30		96		80	
31		106		90	
32		69		83	
43		80		82	
45	178				
70	168				
71	307				
72		107		93	
6			102		77
11					128
12	60		99		110
16	90		124		
17					178
18			109		
19		158			
20	129		120		
21		181			
22		156			
23				132	
24	70		91		
25				139	
26	87		136		125
28	64		98		
33		112		92	
34				184	

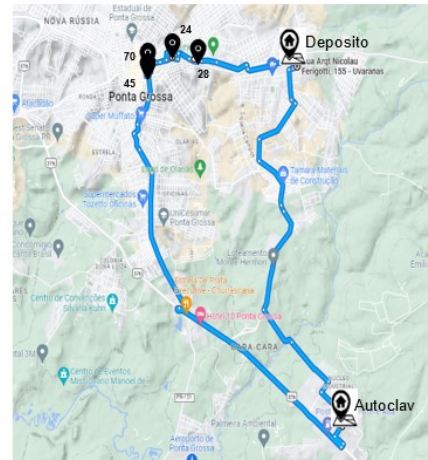
SEMANA 3					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
36			106		75
39				111	
40				139	
44			161		
46	104		112		
73			111		121
35				168	
41	98		75		123
42			106		92
14					90

SEMANA 4					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
4					183
10	90		64		144
5		78		82	
15			140		134
29		99		46	
30		74		54	
31		99		74	
32		75		53	
43		103		78	
45	142		117		
70	141		79		
71	175		122		
72		110		75	
6			114		97
11					99
12			111		143
16	170		101		
17					92
18			82		
19		80			
20		172			
21		157			
22		161			
23				124	
24	144		107		
25				160	
26	109		64		128
28	153		181		
33				128	

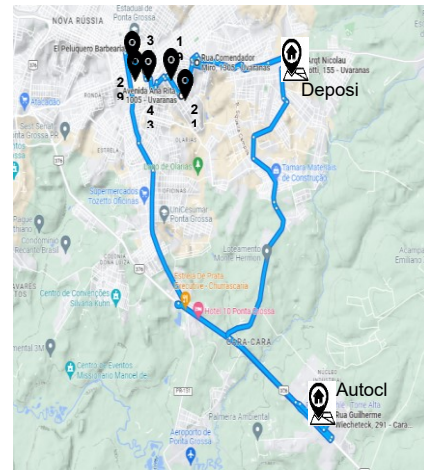
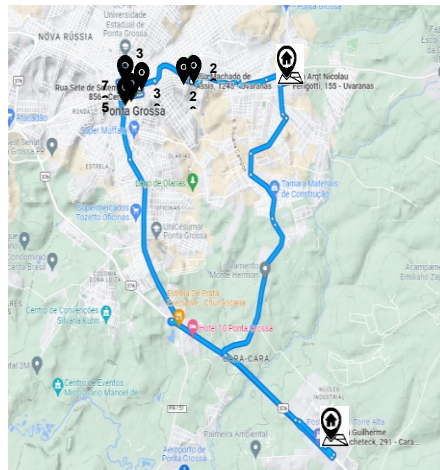
SEMANA 4					
ID	Quantidade coletada tentativa kg/dia				
	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex
34				154	
36			174		99
39				165	
40				107	
44		104		84	
46	184		115		
73		102		70	
35		90		88	
41	99		102		131
42			168		114
14					147

APÊNDICE C - Mapas de rotas dos clientes por semana

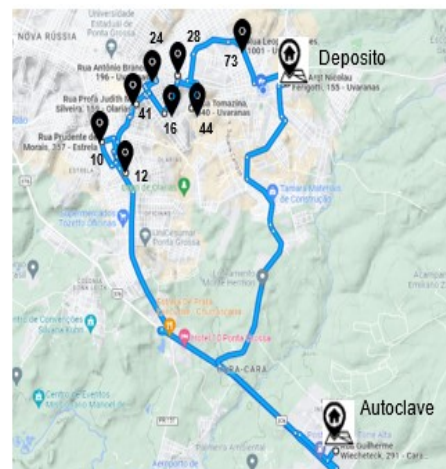
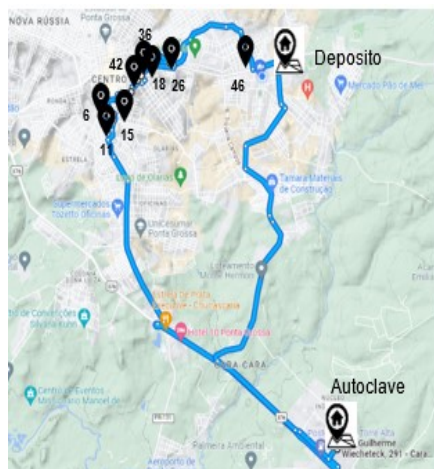
ROTAS - CLIENTES PEQUENOS – SEGUNDA SEMANA



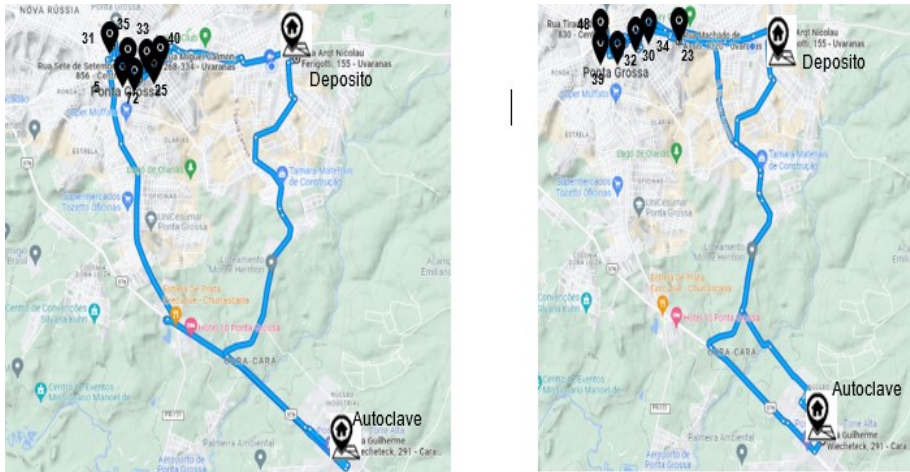
(a) Segunda-feira Rota 1 e Rota 2



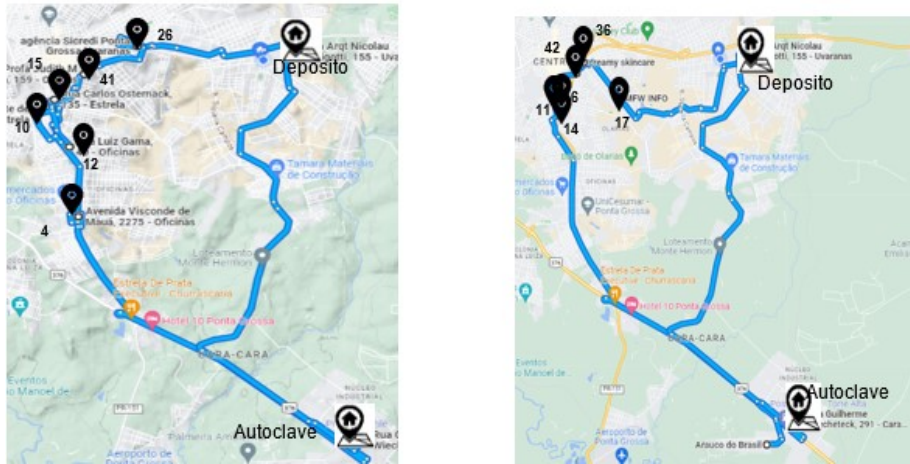
(b) Terça-feira Rota 1 e Rota 2



(c) Quarta-feira Rota 1 e Rota 2

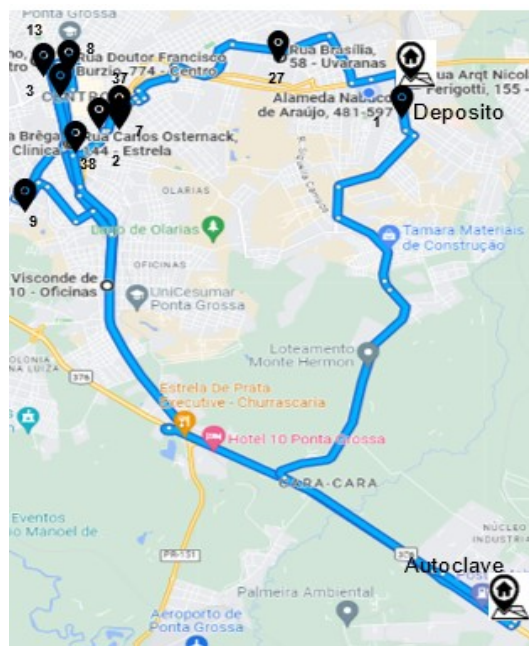


(d) Quinta-feira Rota 1 e Rota 2

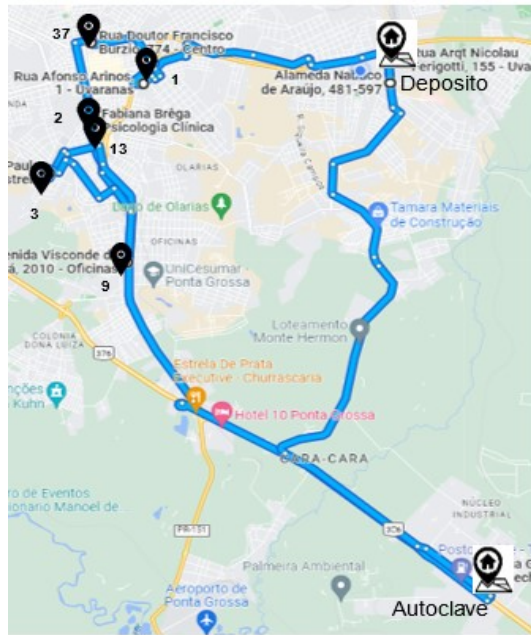


(d) Sexta-feira Rota 1 e Rota 2

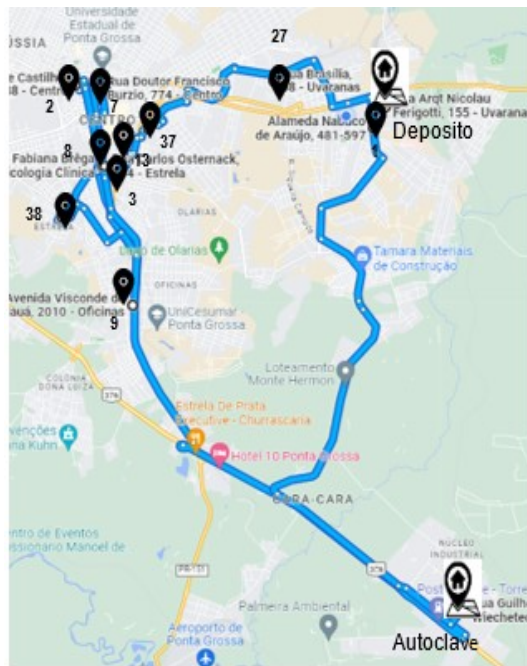
ROTAS - CLIENTES GRANDES- SEGUNDA SEMANA



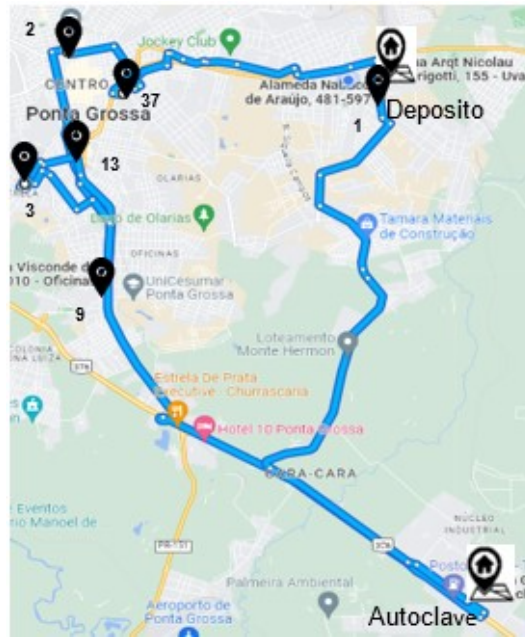
(a) Segunda-feira Rota 1



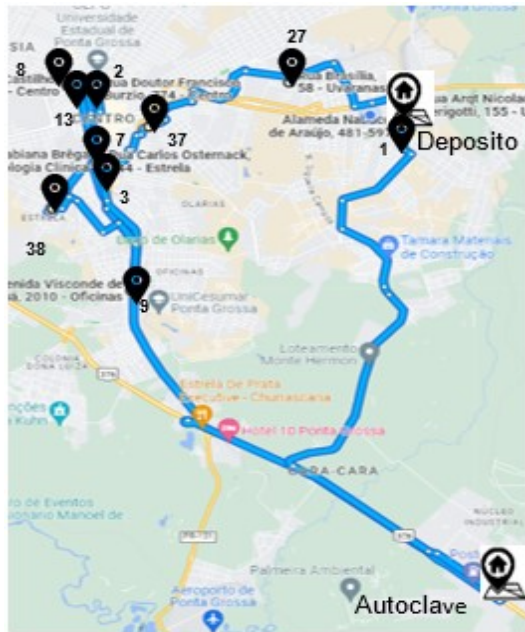
(b) Terça-feira Rota 1



(c) Quarta-feira Rota 1

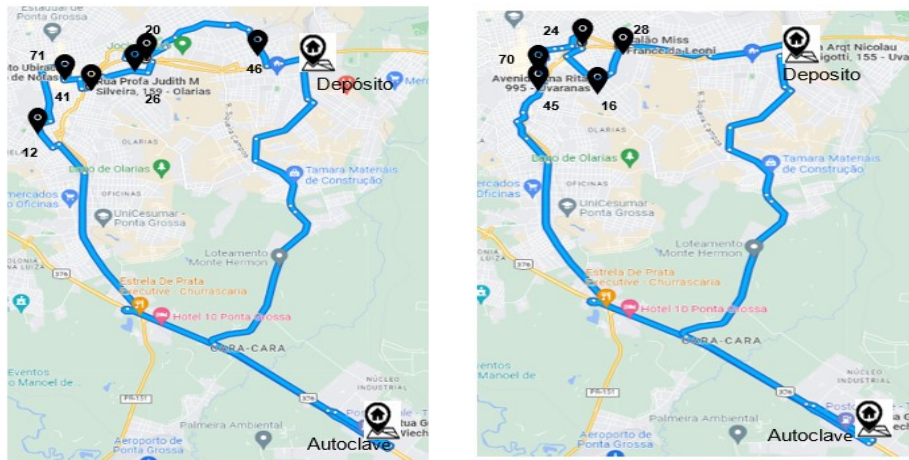


(d) Quinta-feira Rota 1

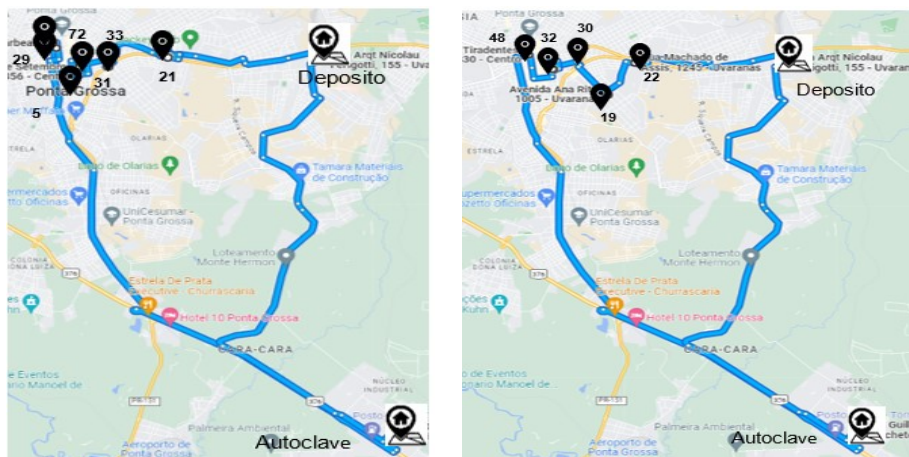


(e) Sexta-feira Rota 1

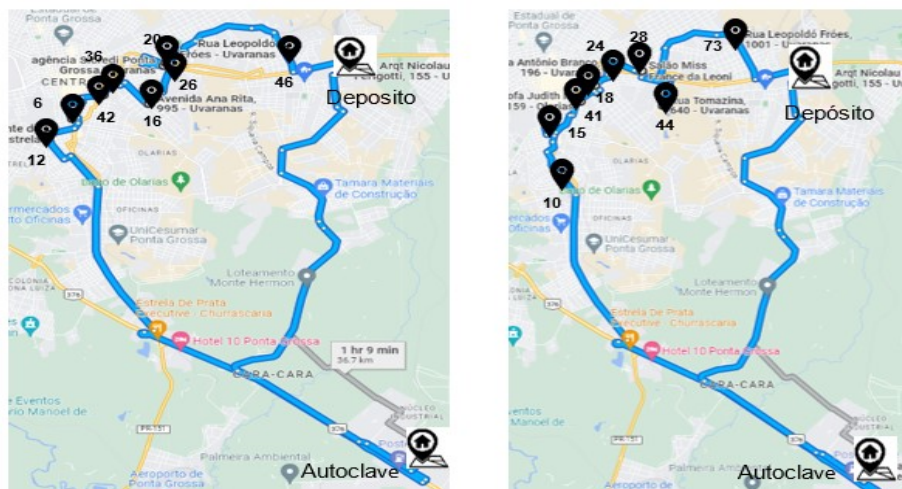
ROTAS - CLIENTES PEQUENOS – TERCEIRA SEMANA



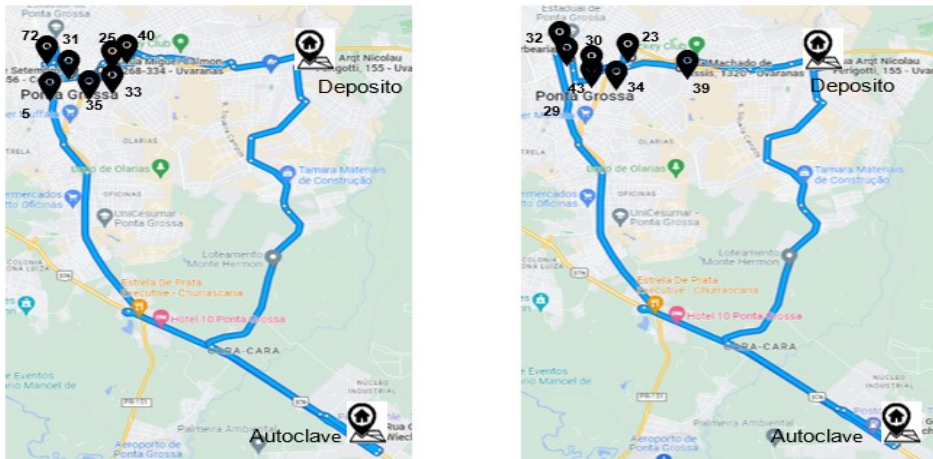
(a) Segunda-feira Rota 1 e Rota 2



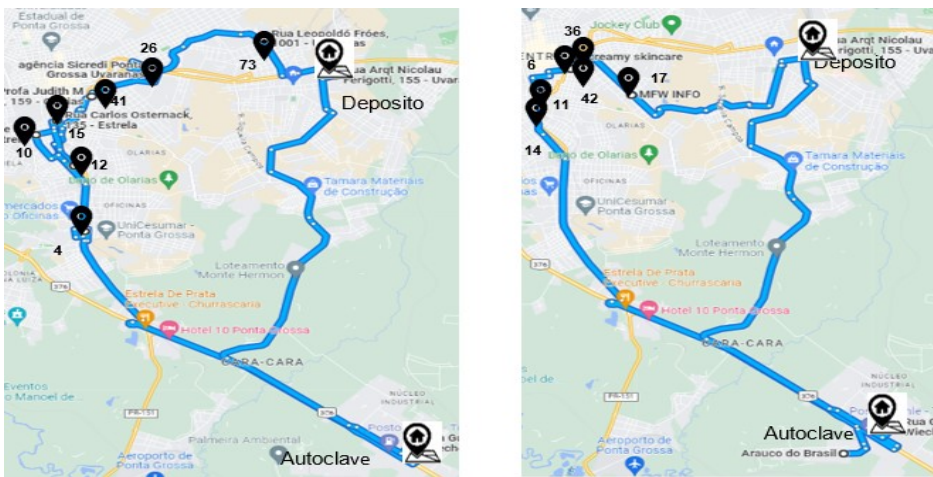
b) Terça-feira Rota 1 e Rota 2



c) Quarta-feira Rota 1 e Rota 2

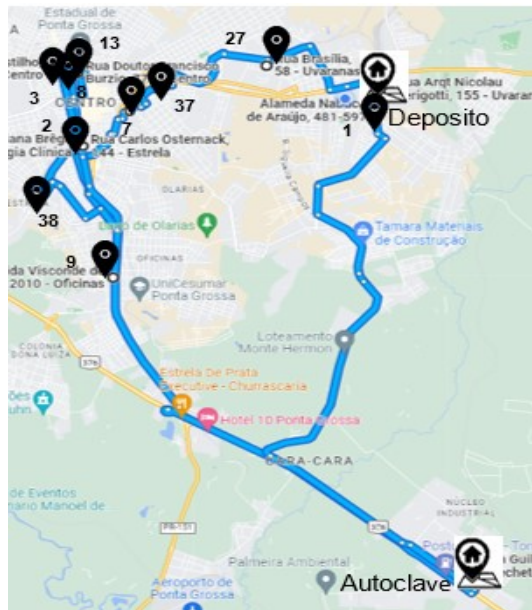


d) Quinta-feira Rota 1 e Rota 2

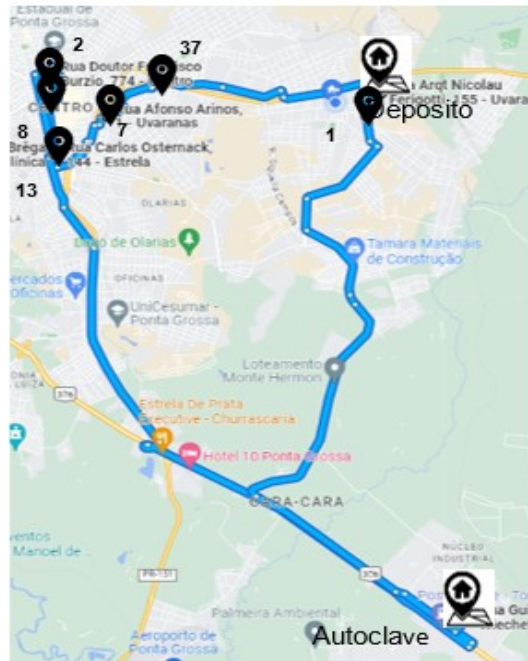


(e) Sexta-feira Rota 1 e Rota 2

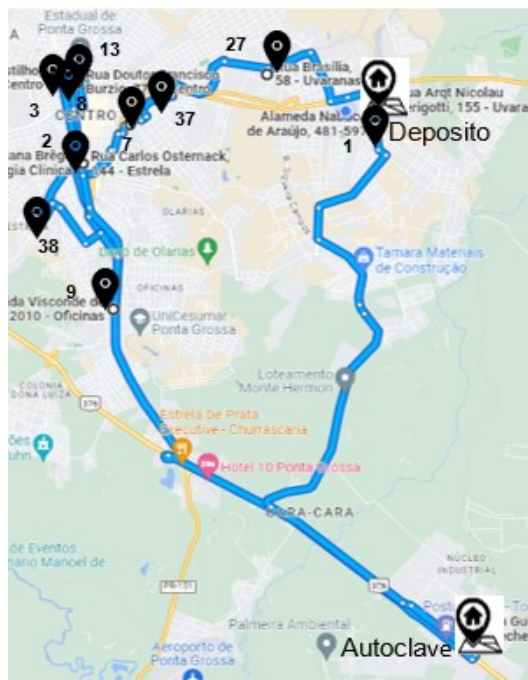
ROTAS - CLIENTES GRANDES- TERCEIRA SEMANA



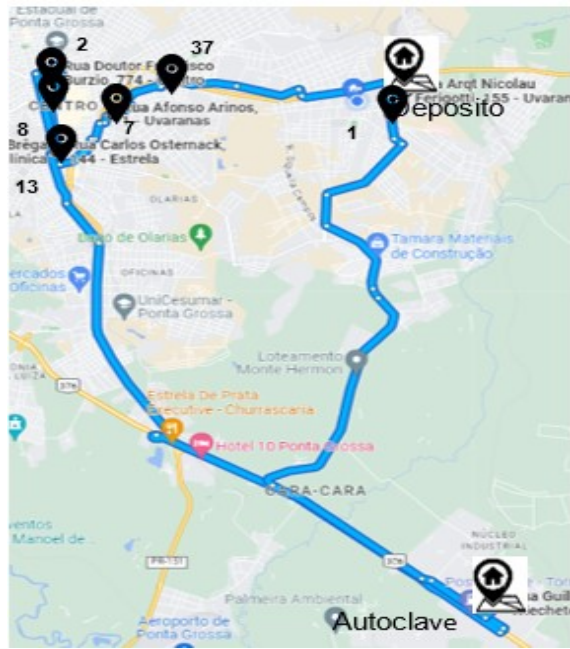
(a) Segunda-feira Rota 1



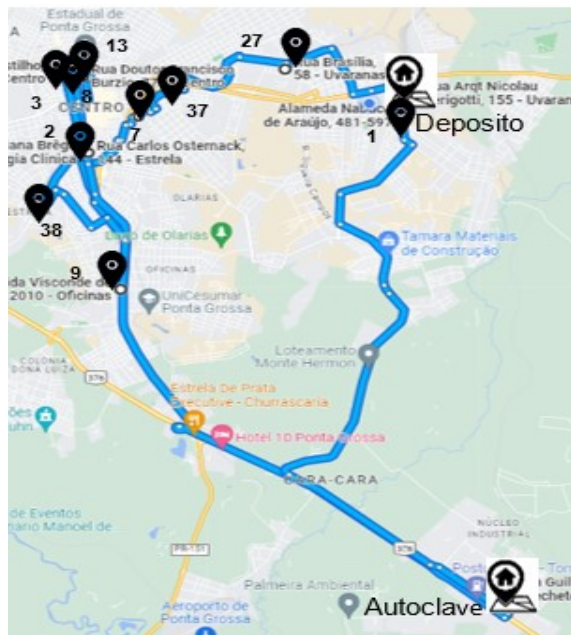
(b) Terça-feira Rota 1



(c) Quarta-feira Rota 1

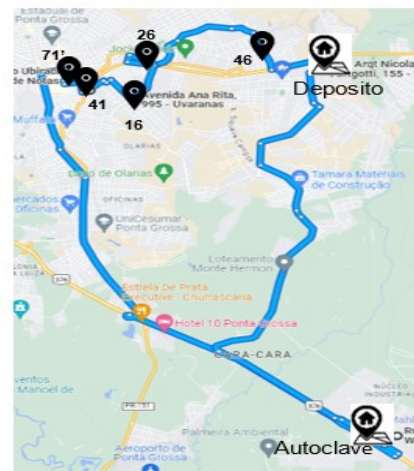


(d) Quinta-feira Rota 1

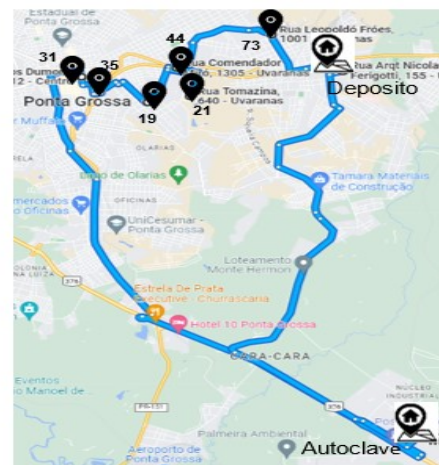
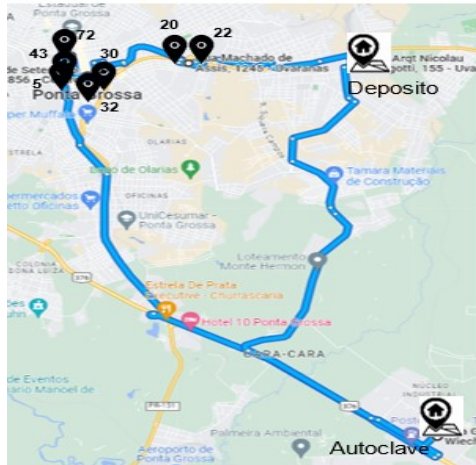


(e) Sexta-feira Rota 1

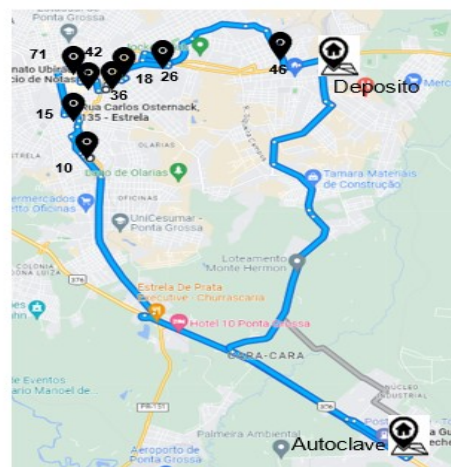
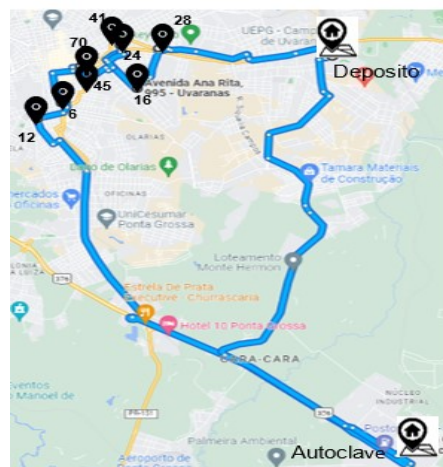
ROTAS - CLIENTES PEQUENOS – QUARTA SEMANA



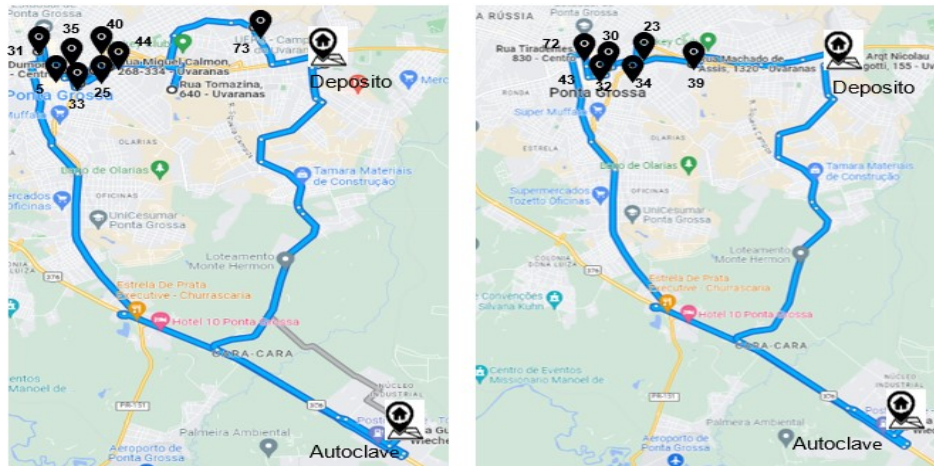
(a) Segunda-feira Rota 1 e Rota 2



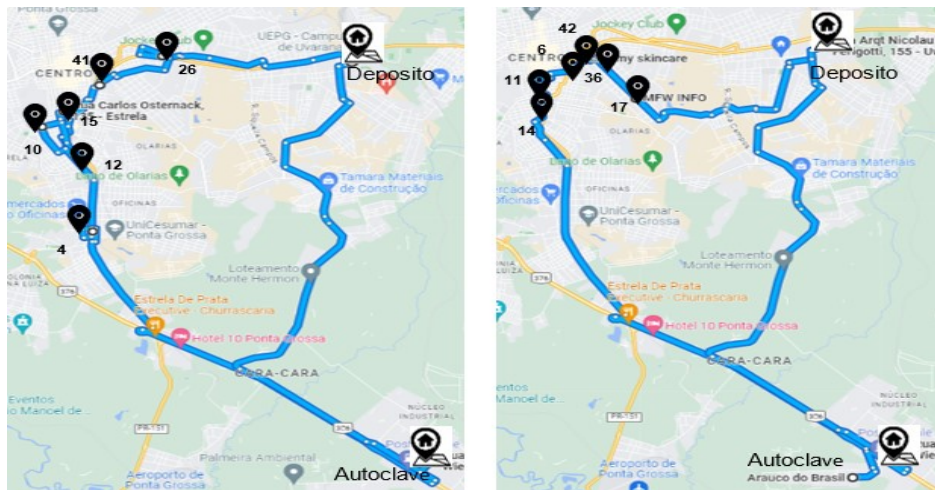
b) Terça-feira Rota 1 e Rota 2



(c) Quarta-feira Rota 1 e Rota 2

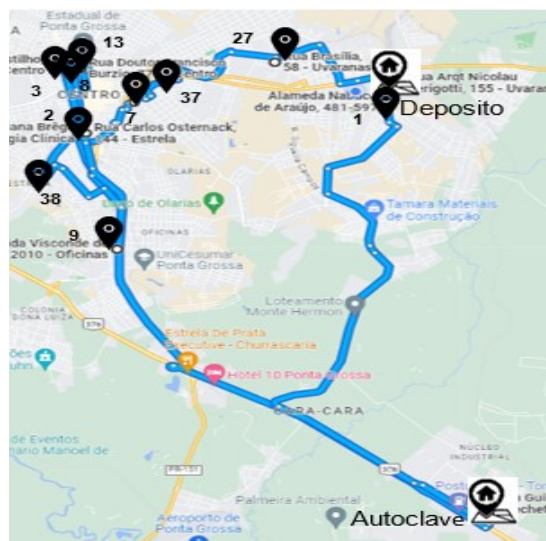


(d) Quinta-feira Rota 1

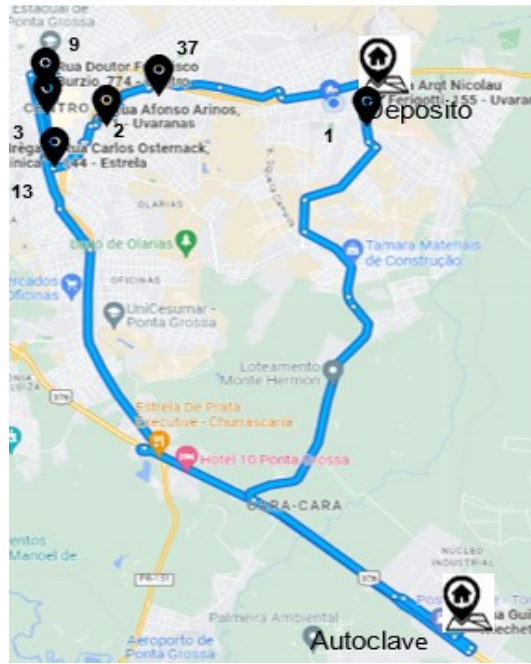


e) Sexta-feira Rota 1 e Rota 2

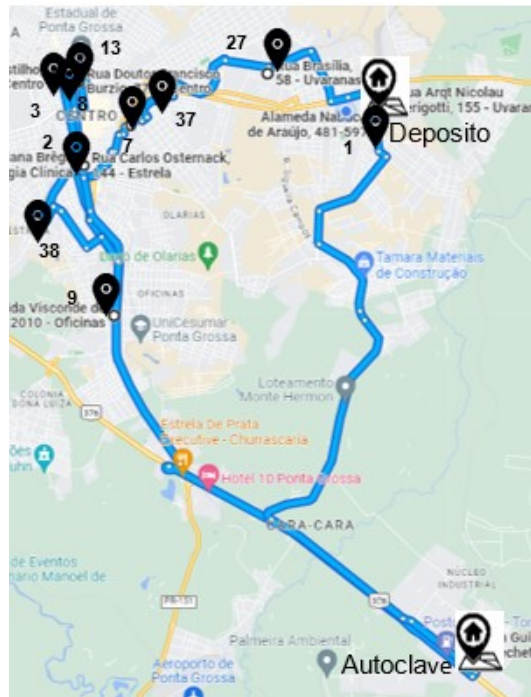
ROTAS - CLIENTES GRANDES- QUARTA SEMANA



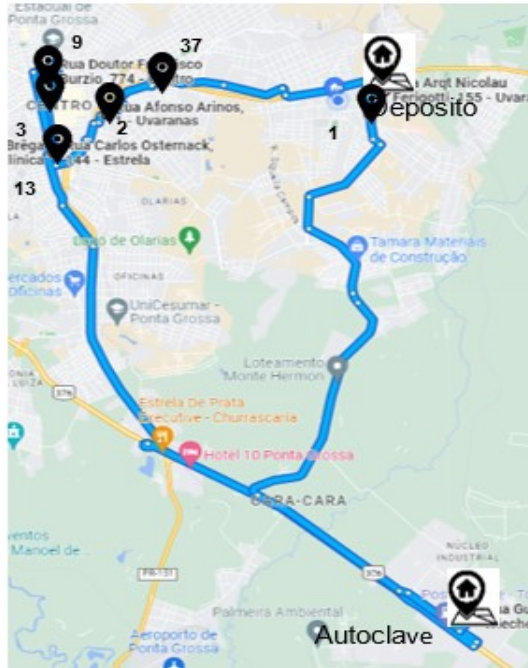
a) Segunda-feira Rota 1



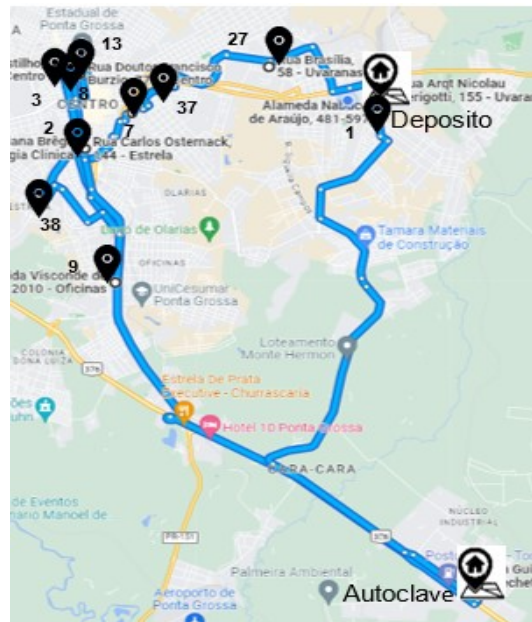
(b) Terça-feira Rota 1



(c) Quarta-feira Rota 1



(d) Quinta feira Rota 1



(e) Sexta-feira Rota 1