

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA: CONSTRUÇÃO CIVIL

CIRO BARBOSA MOREIRA

**PLANEJAMENTO DE ROTAS DE CAMINHÕES ESPECIALIZADOS PARA
COLETA DE CAÇAMBAS CHEIAS DE RESÍDUOS PARA DESTINAÇÃO EM
ATERROS SANITÁRIOS E/OU RECICLADORAS E ENTREGA SIMULTÂNEA DE
CAÇAMBAS VAZIAS VISANDO ATENDER AO RECOLHIMENTO DA DEMANDA
DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS NOS POLOS GERADORES**

VITÓRIA
2022

CIRO BARBOSA MOREIRA

**PLANEJAMENTO DE ROTAS DE CAMINHÕES ESPECIALIZADOS PARA
COLETA DE CAÇAMBAS CHEIAS DE RESÍDUOS PARA DESTINAÇÃO EM
ATERROS SANITÁRIOS E/OU RECICLADORAS E ENTREGA SIMULTÂNEA DE
CAÇAMBAS VAZIAS VISANDO ATENDER AO RECOLHIMENTO DA DEMANDA
DE GERAÇÃO DE RESÍDUOS NOS POLOS GERADORES**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Orientador(a): Prof.(a) Dr. Rodrigo Alvarenga Rosa

VITÓRIA

2022

CIRO BARBOSA MOREIRA

**MODELO MATEMÁTICO PARA PLANEJAMENTO DE ROTAS DE VEÍCULOS
ESPECIALIZADOS EM TRANSPORTE DE CAÇAMBAS DE RESÍDUOS DA
CONSTRUÇÃO CIVIL COM RECARREGAMENTO EM MÚLTIPLOS PÁTIOS E
DESCARREGAMENTO EM MÚLTIPLOS ATERROS**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em _____ de _____ de 2022 por:

Prof.(a) Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Patrício José Moreira Pires
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof Dr. Luciano Lessa Lorenzoni
Instituto Federal do Espírito Santo

A meu Filho Martin, que redefiniu
meu conceito de amar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio e compreensão durante essa jornada.

A minha esposa Isabela pelo companheirismo, paciência e acolhimento.

A meu filho Martin pela alegria e leveza mesmo nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais, José e Zilda, e a minha avó Dalila pelas orações e suporte.

RESUMO

O crescimento da quantidade de resíduos de construção civil produzidos é uma constante nos últimos anos. Visando reduzir impactos causados pela descarte incorreto desses resíduos políticas públicas vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos para fomentar e organizar diretrizes para o poder público e a iniciativa privada darem a destinação correta a estes resíduos. Com o objetivo tornar a etapa de transporte desses resíduos mais eficiente através da utilização da menor quantidade de veículos possível e da menor distância percorrida por estes veículos, essa dissertação propõe uma nova classificação para o problema de transporte denominada *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows*, para ser uma ferramenta de auxílio ao planejamento em um problema de coletas e entregas. A finalidade deste modelo é minimizar a quantidade de veículos utilizados e a distância percorrida por eles a fim de realizar o atendimento de todas as demandas de todos os clientes. Nesse modelo são considerados, múltiplas garagens para partida e chegada dos veículos, período de atendimento para cada cliente, pátios para coleta de caçambas vazias e aterros para esvaziamento de caçambas cheias coletadas. Esse modelo matemático foi submetido ao *solver* IBM CPLEX® 22.1 em instâncias teóricas elaboradas junto a uma empresa de soluções em tecnologia para resíduos. Foi apresentado um modelo matemático que atende os problemas desse estudo, no qual foram incorporados vários parâmetros de diversos problemas de transporte, tornando este problema único. Após testes realizados o modelo foi considerado eficaz na busca de soluções em um problema de roteamento com múltiplos parâmetros.

Palavras-chave: Roteamento de veículos; *Pickup-and-Delivery* Simultâneo; Resíduo da Construção Civil.

ABSTRACT

The growth in the amount of construction waste produced has been constant in recent years. In order to reduce the impacts caused by the incorrect disposal of this waste, public policies have been developed over the years to encourage and organize guidelines for the public authorities and the private sector to correctly dispose of these wastes. With the aim of making the transport stage of this waste more efficient by using the least amount of vehicles possible and the shortest distance traveled by these vehicles, this dissertation proposes a new classification for the transport problem called Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facility and Time Windows, to be a tool to help plan a pick-up and delivery problem. The purpose of this model is to minimize the number of vehicles used and the distance traveled by them in order to meet all the demands of all customers. In this model, multiple garages for departure and arrival of vehicles, service period for each customer, patios for collecting empty buckets and landfills for emptying full buckets collected are considered. This mathematical model was submitted to the IBM CPLEX® 22.1 solver in theoretical instances elaborated with a technology solutions company for waste. A mathematical model was presented that meets the problems of this study, in which several parameters of different transport problems were incorporated, making this problem unique. After tests carried out, the model was considered effective in the search for solutions in a routing problem with multiple parameters.

Keywords: Vehicle Routing Problem; Simultaneous *Pickup-and-Delivery*; Civil Construction Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Caçambas Estacionárias de Ação Múltipla acondicionando RCC.....	18
Figura 2 - Caminhão Poliguindaste e Caçamba Estacionária.....	18
Figura 3 - Caçambas Estacionárias de Ação Múltipla acondicionando RI.....	19
Figura 4- Caçamba Estacionária de Ação Múltipla acondicionando RI sobre caminhão Munck	19
Figura 5 - Planejamento de Rotas para Coleta e Entrega de caçambas, utilizando pátios e aterros.....	16
Figura 6-Etapas desenvolvidas	29
Figura 7- Caminhões Poliguindastes em atendimento ao Cliente	30
Figura 8- Ilustração dos Conjuntos do Problema (Parte1)	36
Figura 9-Ilustração dos Conjuntos do Problema (Parte2).....	36
Figura 10- Representação Gráfica Instância 2.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Relação de Características dos Artigos Revisados	26
Tabela 2- Parâmetros dos Modelos de Veículos	32
Tabela 3- Características das Instâncias	32
Tabela 4 - Resultados das Instâncias no CPLEX	43
Tabela 5- Resultados Operacionais	45
Tabela 6- Descritivo resultados Grupo 1	46
Tabela 7- Descritivo resultados Grupo 2	50
Tabela 8- Descritivo resultados Grupo 3	52
Tabela 9- Descritivo resultados Grupo 4	54
Tabela 10- Descritivo resultados Grupo 5	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Veículos Utilizados por Instância 2, 5, 10 ,14 e 15.....	59
Gráfico 2- Custo Total por Instância 2, 5, 10 ,14 e 15.....	59
Gráfico 3- Distância total Percorrida 2, 5, 10 ,14 e 15	60
Gráfico 4- Veículos Utilizados por Instância 7, 12 e 16.....	61
Gráfico 5-Custo Total por Instância 7, 12 e 16.....	61
Gráfico 6- Distância total Percorrida 7, 12 e 16	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ACS	Ant Colony System
AECM	Augmented ε -Constraint Method
ALNS-TS	Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search with Tabu Search
API	Application Programming Interface
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
ECM	ε -Constraint Method
FINDES	Federação das Indústrias do Estado do Espírito Santo
G-VRP-CAFS	Green Vehicle Routing Problem with capacitated Alternative Fuel Stations
HACO	Hybrid Ant Colony
HALNS	Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search
HConVRP	Consistent Vehicle Routing Problem With Heterogeneous Fleet
HTS	Hierarchical Tabu Search
HVRPTW-LR	Heterogeneous Vehicle Routing Problem With Time Windows and Limited Number of Resources
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LBBD	Logic-Based Benders Decomposition
LNS	Large Neighborhood Search
LRPTDD	Location-Routing Problem with Time-Dependent Demands
MC-2E-VRPTW	Multi-Commodity Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows
MDVRP	Multi-Depot Vehicle Routing Problem
MILP	Mixed Integer Linear Programming

PNRS Política Nacional de Resíduos Sólidos

RAA Resíduos Agrossilvopastoris e Agroindustriais

RCC Resíduos da Construção Civil

REEE Resíduos Eletroeletrônicos

RI Resíduos Industriais

RLRO Resíduos com Logística Reversa Obrigatória

RM Resíduos de Mineração

RMGV Região Metropolitana da Grande Vitória

RSPS Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento

RSS Resíduos de Serviços de Saúde

RST Resíduos de Serviços de Transportes

RSU Resíduos Sólidos Urbanos

SA Simulated annealing

SDVRP Site Dependent Vehicle Routing Problem

SDVRPSTW Site-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Window

TS Tabu Search

VNDS-HL Variable Neighborhood Descent Tabu Search algorithm with Holding List

VRPIRF Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities

VRPTW Vehicle Routing Problem with Time Windows

VRSPD Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery

WIZE Wize Company Tecnologia LTDA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	JUSTIFICATIVA.....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE VRP	20
3	METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	29
3.1	ETAPAS DESENVOLVIDAS	29
3.1.1	O Problema Analisado	29
3.1.2	Elaboração do modelo matemático	31
3.1.3	Instâncias de teste	31
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	34
5	RESULTADOS E ANÁLISES	43
5.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO.....	44
5.2	ANÁLISE OPERACIONAL DOS RESULTADOS DAS INSTÂNCIAS.....	44
5.2.1	Resultados instâncias Grupo 1	45
5.2.2	Resultados instâncias Grupo 2	49
5.2.3	Resultados instâncias Grupo 3	51
5.2.4	Resultados instâncias Grupo 4	53
5.2.5	Resultados instâncias Grupo 5	56
5.2.6	Comparação de Resultados das Instâncias Equivalentes	58
5.2.6.1	<i>Instâncias 2, 5, 10, 14 e 16</i>	58
5.2.6.2	<i>Instâncias 7, 12, 16</i>	60
5.3	PRINCIPAIS PONTOS OBSERVADOS	62
6	CONCLUSÕES	63
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Há décadas o Brasil vem criando proibições e regulações com o intuito de minimizar e impedir a poluição. Em se tratando de resíduos sólidos um importante marco foi realizado em 2010, ano o qual foi instituída no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei 12.305 de 2 de Agosto, na qual foram dispostas os princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes relacionados a gestão dos resíduos sólidos para entes públicos e privados (BRASIL, 2010).

Após esse lei os estados e municípios do país tiveram que se adequar e criar seus planos para realizar a gestão dos resíduos o que foi um importante avanço para a redução de possíveis impactos ambientais. A resolução nº001 do CONAMA, de 23 de janeiro de 1986, em seu artigo 1º define impacto ambiental como:

[...]qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população;

II - As atividades sociais e econômicas;

III - a biota;

IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;

V - A qualidade dos recursos ambientais. (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986)

Gerir de maneira correta os resíduos é importante , dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) indicam que os resíduos não coletados ou destinados de forma incorreta chegam a impactar a vida e saúde de 77 milhões de brasileiros , gerando um custo de aproximadamente 1 bilhão de dólares por ano para tratamento de saúde e recuperação ambiental. (ABRELPE, 2020).

Segundo a PNRS os resíduos sólidos podem ser classificados por sua origem como: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU); Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento (RSPS); Resíduos da Construção Civil (RCC); Resíduos de Serviços de Saúde (RSS); Resíduos de Serviços de Transportes (RST); Resíduos de Mineração (RM);

Resíduos Industriais (RI) Resíduos Agrossilvopastoris e Agroindustriais (RAA); Resíduos com Logística Reversa Obrigatória (RLRO) e Resíduos Eletroeletrônicos (REEE). Ou seja ao se tratar de resíduos sólidos esta se tratando de uma grande gama de materiais que podem ter ou não reaproveitamento.

A gestão dos resíduos é de utilidade pública e contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa. Ela permite que produtos sejam aproveitados após serem utilizados, fornece matérias primas para a reciclagem, pode fornecer combustíveis e energia. (ABRELPE, 2021).

Utilizando como referencia dados sobre os resíduos produzidos pela construção civil da Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), no plano diretor de resíduos sólidos publicados pelo Instituto Brasileiro de Administração municipal (IBAM) indicavam que em 2009 já eram produzidos 1.620,14t/1000habitantes/ano de RCC, (IBAM, 2009). Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) indicam que no Brasil a quantidade de resíduos da construção coletados saltou de 33.377.060 toneladas/ano em 2010 para 44.534.380 toneladas/ano em 2019 (ABRELPE, 2020).

O grande volume de resíduos produzido pela construção civil é justificado pelo tamanho e importância desta atividade econômica no cenário nacional. Dados publicados em 2022 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) na sua Pesquisa Anual da Indústria da Construção (PAIC) referente ao ano de 2020 indicam que a Indústria da Construção movimentou R\$ 304,4 Bilhões em obras ou serviços, além de ocupar 2 milhões de pessoas no ano de 2020 (IBGE, 2022). Dados do Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado do Espírito Santo (Sinduscon-ES) indicam que a construção é responsável por 4,5% do PIB do estado, representa 1,6% da receita corrente dos municípios do estado e é responsável por 52 mil empregos diretos e 139 indiretos (SINDUSCON-ES, 2022). Assim como a construção os outros tipos de resíduos vem sofrendo aumentos de produção devido ao crescimento populacional bem como o adensamento urbano.

Para a realização do transporte volumes significativos de resíduos é através da utilização de caçambas estacionárias de aplicação múltipla, Figura 1, e estas são

transportadas pelo caminhão poliguindaste, Figura 2. Esses veículos tem a capacidade de movimentar as caçambas, vazias ou carregadas, do solo até sua carroceria bem como de sua carroceria até o solo. De acordo com a NBR 14728 que trata das especificações de construção das caçambas estacionárias de ação múltipla operadas por poliguindastes, as caçambas podem ter vários volumes sendo que a capacidade de carga da caçamba e dada pelo tipo e a densidade do material acondicionado (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005). As caçambas são denominadas de ação múltipla pois seu formato permite sua utilização para transportar variados tipos de materiais .A capacidade do chassi do veículo poliguindaste também deve ser adequada para ser capaz de transportar, transferir, depositar ou bascular o conteúdo das caçambas. Embora comumente utilizado nas cidades para acondicionamento de RCC estas caçambas são utilizadas para outros tipos de resíduos em outros locais e atividades. As figuras 3 e 4 mostram a utilização de caçambas em atividades resíduos em operação industrial.

Figura 1- Caçambas Estacionárias de Ação Múltipla acondicionando RCC



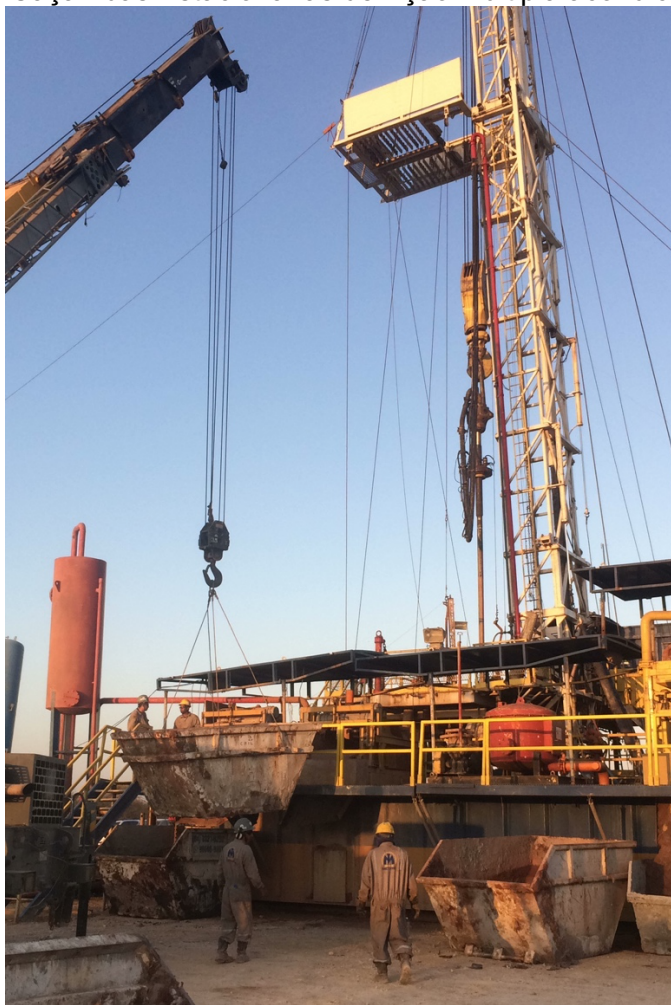
Fonte: Autor

Figura 2 - Caminhão Poliguindaste e Caçamba Estacionária



Fonte : Wize Company Tecnologia LTDA

Figura 3 - Caçambas Estacionárias de Aço Múltipla acondicionando RI



Fonte: Autor

Figura 4- Caçamba Estacionária de Aço Múltipla acondicionando RI sobre caminhão Munck



Fonte: Autor

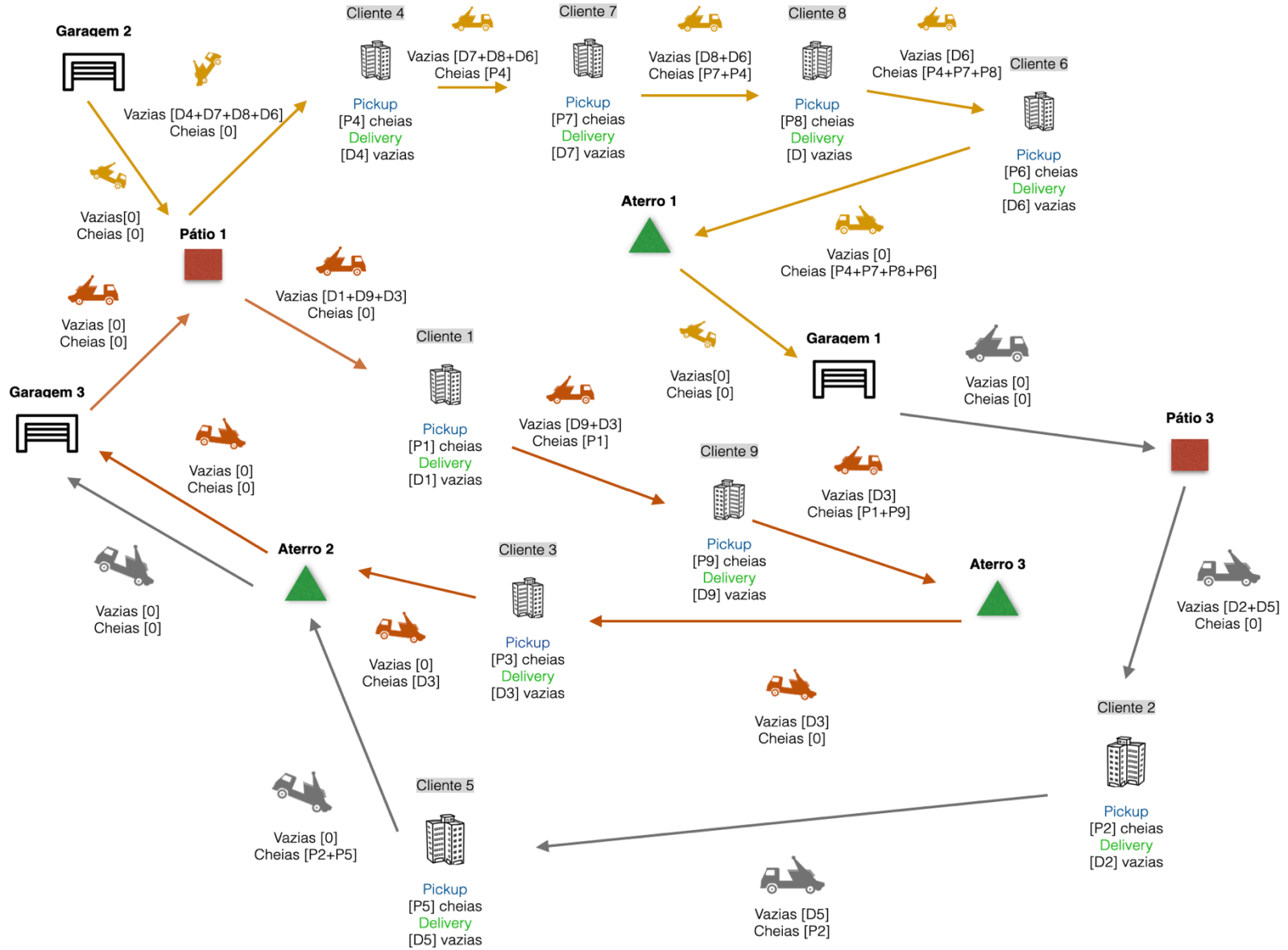
A utilização do conjunto veículo poliguindates e caçambas é comumente utilizada por se tratar de uma maneira rápida e segura de transportar grandes volumes de resíduos. O planejamento do uso dos veículos disponíveis tem como objetivo realizar a maior quantidade de entregas de caçambas vazias e coleta de caçambas cheias possíveis em um único dia. Ele também visa minimizar a quantidade de veículos utilizados para o transporte e a redução da distância total percorrida por todos os veículos.

Apresentado esses pontos esse trabalho visa ser uma ferramenta a ser utilizada em um problema de transporte em prol de uma questão ambiental. Com o objetivo de tornar o transporte mais eficiente pode atender cada vez mais clientes a um custo cada vez menor. Sendo assim esse trabalho propõe um planejamento para entrega de caçambas e coleta de caçambas de Resíduos. Este planejamento considera o uso de múltiplos pátios onde são armazenadas as caçambas vazias, de múltiplos aterros onde as caçambas cheias são esvaziadas, múltiplas garagens e por fim múltiplos veículos. Buscando utilizar a menor quantidade de veículos e percorrendo a menor distância possível a fim de atender toda demanda dos clientes em um determinado dia.

Os veículos iniciam suas rotas nas garagens, sendo que nessas garagens não existem caçambas, fazendo com que antes de realizar entregas de caçambas vazias eles passem antes em um pátios. O veículo pode sair de uma garagem para um cliente para coletar suas caçambas cheias diretamente, mas antes de retornar a uma garagem ele deve obrigatoriamente esvaziar as caçambas em um aterro. Ao passar em pátio ele pode atender clientes com caçambas cheias e vazias desde que respeitada a capacidade máxima do veículo. Uma vez que tenha caçambas cheias ele pode se direcionar para outro cliente, para o pátio, entretanto antes de retornar a garagem final ele sempre deve passar em um aterro. Ou ainda passando em um aterro e esvaziando e limpando a caçamba ele pode continuar sua rota para outro cliente ou outro pátio, dessa forma a única limitação do veículo é o tempo.

A Figura 5 apresenta uma representação de um conjunto de rotas para esse problema. São apresentados por cores diferentes as rotas realizadas por cada um dos veículos, indicando sua garagem de partida, os clientes atendidos, as passagens por pátios para coleta de caçambas e a passagem por aterros para esvaziar as caçambas cheias, também são apresentadas capacidade de caçambas vazias e cheias de cada veículo a cada passagem por cliente, aterro, pátio e ao chegar na sua garagem final.

Figura 5 - Planejamento de Rotas para Coleta e Entrega de caçambas, utilizando pátios e aterros



Fonte : Autor

Todos os veículos possuem a mesma capacidade de acondicionar caçambas em sua carroceria, no entanto eles diferem na capacidade de carregar determinadas caçambas de determinados clientes devido ao peso destas. Sendo assim nem todos os veículos podem atender todos os clientes devido a essa condição.

Visando apoiar a tomada de decisão dos planejadores da empresa de soluções tecnológicas de transporte de resíduos, em um problema com múltiplas garagens, pátios, aterros, frota heterogênea, períodos de atendimentos específicos por cliente, é proposto um modelo matemático baseado nos modelos :

Problema	Contribuição
<p><i>Site Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP), -</i></p> <p><i>Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery (VRSPD) ,</i></p> <p><i>Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP) ,</i></p> <p><i>Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities (VRPIRF)</i></p> <p><i>Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Tipos variados de veículos com restrição de compatibilidade do veículo a cliente. • Coleta e entrega realizada de maneira simultânea • Múltiplos pontos de partida e chegada • Recarregamento em locais intermediários da rota • Intervalo de tempo para atendimento de cada cliente definido

O modelo deste trabalho é definido como um *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows*. Não foram encontrados trabalhos científicos que tratassem desse problema proposto. Desta forma esse trabalho visa contribuir sendo uma abordagem diferente e ampla, a qual considera todos os modelos utilizados como referência em um único modelo.

Embora as instâncias criadas para avaliação e validação do modelo sejam aplicáveis a outros problemas de CVRP, estas instâncias foram baseadas em dados e informações colhidos com a Wise Company LTDA, uma empresa que oferece soluções tecnológicas em gestão de resíduos.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa dissertação é desenvolver um modelo matemático para obter rotas eficientes para os veículos coletores de caçambas de resíduos para atendimento das demandas dos clientes localizados em uma região metropolitana .

1.1.2 Objetivos Específicos

- Criar e analisar diversos cenários com variações de pátios, aterros, veículos, janelas de atendimento para verificar seus respectivos impactos;
- Apresentar e discutir resultados e considerações sobre o modelo e as instâncias.

1.2 JUSTIFICATIVA

A coleta de Resíduos é normalmente realizada através de rotas baseadas em considerações empíricas, sendo que a demanda por coleta de caçambas cheias e entrega de caçambas vazias é informada pelo cliente. Embora a definição empírica das rotas torne o planejamento menos complexo, ela pode produzir soluções menos eficientes de que rotas planejadas por auxílio de modelos, percorrendo distâncias maiores e utilizando mais veículos do que o necessário. Outro ponto relevante é que como a decisão de coletar ou de entregar a caçambas é do cliente este pode fazê-la em momento não ideal, deixando capacidade ociosa em uma caçamba ou até excedendo o limite da mesma.

Pensando em fornecer soluções para estas questões, a empresa Wize Company Tecnologia LTDA (Wize) desenvolveu sensores capazes de medir o volume utilizado das caçambas, tornando assim possível definir no início de cada dia quais clientes tem as caçambas cheias a serem recolhidas e caçambas vazias a serem entregues para substituir ou complementar as disponíveis. E este trabalho é parte do projeto de

solução da empresa, e tem por objetivo fornecer um modelo matemático que seja capaz de apoiar na solução do problema de transporte. A utilização de modelos é uma excelente ferramenta para buscar soluções para problemas do mundo real, já que nem sempre é possível experimentar com o mundo real, realizar essas experimentações pode ser caro ou até impossível.

Esse trabalho é apoiado pela Wize através do projeto "WIZE WASTE MANAGEMENT SYSTEM" vinculado Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), EDITAL FAPES No 01/2020 APOIO A PROJETOS INOVADORES E *SPIN OFF*. Os dados utilizados para realização desta dissertação serão obtidos diretamente da empresa através deste convênio.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para atender os objetivos desse trabalho, o conteúdo será estruturado em seis capítulos sendo :

O Capítulo 1 responsável por apresentar e introduzir o problema estudado através de uma breve contextualização. Nele também estão o objetivo geral, os objetivos específicos bem como a justificativa para a realização deste trabalho;

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema como *Site Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP)*, *Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery (VRSPD)* , *Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)* , *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities (VRPIRF)* e *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)*.

O Capítulo 3 explica a metodologia e descreve o problema dessa dissertação e apresenta as instâncias.

O Capítulo 4 apresenta o modelo matemático proposto que fundamenta esse trabalho.

O Capítulo 5 traz os resultados e análises dos experimentos computacionais realizados com modelo matemático e as instâncias elaboradas.

Por fim o Capítulo 6 apresenta as conclusões e também as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é realizado o embasamento teórico deste trabalho. São levantados vários conceitos de diferentes tipos de *Vehicle Routing Problem* (VRP). Por não existir uma padronização na nomenclatura, dos problemas propostos pelos autores de textos sobre o tema, foram buscados problemas que tratassem de questões relevantes e que abordassem as características principais que fundamentam esse trabalho. como, múltiplos depósitos, recarregamento, intervalo para atendimento de cliente, múltiplos depósitos e coleta e entrega simultânea.

2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DE VRP

Shahabi-Shahmiri, Asian, *et al.* (2021) propuseram um modelo multi-objetivo de programação inteira mista (MILP) para planejar rotas de veículos heterogêneos carregando bens perecíveis ou não em um sistema com múltiplos depósitos intermediários, mimetizando um problema de supermercados. Os objetivos do modelo eram minimizar o custo de transporte e acelerar o processo de entrega e para isso foi considerado a maximização o uso da capacidade dos veículos e a possibilidade de coletas e entregas parciais. Instancias com dados reais foram utilizadas obtendo significativas reduções no tempo de entrega e nos custos.

Ke e Y. Tulett, (2021) realizaram um estudo sobre o transporte de materiais perigosos por caminhões. Ele avaliaram a utilização da otimização robusta em um problema de roteamento por localização com indisponibilidade, parâmetros de tempo e janelas de tempo. Foram utilizados variações de custo e de risco, indicadores foram criados para definir um modelo robusto e confiável. Os resultados mostram a relação ente materiais de risco e custo e introduz indicadores para apoiar os tomadores de decisão. É utilizado o método *Augmented ϵ -Constraint Method* (AECM) para examinar a relação entre os objetivos. Esse método é capaz de delimitar a escala de um objetivo sobre o outro, deixando o tomador de decisão livre da função de determinar pesos,

Fateme Attar, Mohammadi, et al (2022) realizaram um estudo sobre a produção de veículos elétricos utilizando MILP através do solver IBM CPLEX®. No problema

prosto a limitação da capacidade de bateria e estações de carregamento são consideradas, também é considerada a possibilidade de recarga parcial para resolver o problema de recarga longa. São consideradas instâncias com frotas heterogêneas e homogêneas. Para contornar a característica *NP-hard do problema* foram definidos algoritmos exatos chamados *Logic-Based Benders Decomposition* (LBBD) que se mostraram mais eficientes que o MILP.

Ma, Wu e Dai (2017) desenvolveram um modelo para tratar da entrega de produtos perecíveis, considerando maximizar os lucros do fornecedor dos produtos. A janela de tempo serve para definir a não adequação da entrega que gera perda de receita, além disso esse modelo considera o tempo de partida do veículo para mensurar a deterioração dos produtos. Foram utilizados um método *Hybrid Ant Colony* (HACO) com *Large Neighborhood Search* (LNS) os resultados foram comparados com o Solver IBM CPLEX® comparando-se seus tempo de execução e respostas. A recomendação do trabalho foi usar veículos maiores em situações com menor transito, e a definição de um coeficiente de perda por cliente para ser possível identificar clientes mais importantes.

Pasha, Nwodu, et al. (2022) estudaram um problema de distribuição de bens/mercadorias em cenários de urgência na qual as cadeias de suprimento estão afetadas. A solução proposta é a utilização de veículos que transportem *containers* com módulos de produção prontos para serem utilizados, baseado no conceito é conhecido como *factory-in-box*. O foco desse estudo é a seleção de veículos para a produção considerando rotas ótimas, para a cadeia de suprimento formada por depósitos, fornecedores, fabricantes e clientes. Métodos metaheurísticos são propostos e os resultados mostram melhores resultados frente ao *ϵ -Constraint Method* (ECM).

Voigt, Frank, et al. (2022) realizaram um estudo com os problemas *two-echelon VRP* (2E-VRP), *the location routing problem* (LRP), and the *multi-depot VRP* (MDVRP). Como os problemas podem ser modelados como 2E-VRP em casos especiais eles desenvolveram um método único para a solução desse problema através de um metaheurística *Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search*

(HALNS). Os experimentos computacionais desse estudo com conjuntos da literatura mostram competitividade da metaheurística.

Lacomme, Rault e Sevaux (2021) propuseram um sistema de apoio a tomada de decisão em VRP com grandes instâncias considerando restrições presentes no mundo real. O objetivo principal do estudo é propor um modelo que consiga resolver problemas estáticos e dinâmicos. Ele é motivado em especial pelas necessidades de *last-mile* em problemas de cadeia de suprimentos. Ao final é concluído que o API utilizado é capaz de tratar uma grande variedade de VRP's

Yu, Normasari e Chen (2021) incorporaram a janela de tempo em um problema de localização criando um modelo *location-routing problem with time-dependent demands* (LRPTDD). Eles desenvolveram uma heurística *Simulated annealing* (AS) e compararam com instâncias do problema de localização e mostraram eficiência da metodologia proposta.

Já Zare-Reisabadi e Hamid Mirmohammadi (2015) consideraram em seu estudo um problema *Site-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Window* (SDVRPSTW) modelado em *Integer Linear Programming* (ILP). Eles propuseram dois algoritmos, um *Ant Colony System*(ACS) e um *Tabu Search*(TS) para tratar o problema em instâncias maiores. Para avaliar os algoritmos foram realizados testes em vários cenários e escalas. Os resultados mostraram o ACS com performance superior ao TS.

Stavropoulou (2022) estudou um novo problema de roteamento de veículos o *Consistent Vehicle Routing Problem With Heterogeneous Fleet* (HConVRP) , no qual é considerada a consistência do atendimento ao cliente. Um modelo matemático que atende todos os atributos do problema foi criado e utilizado para solucionar instâncias menores com soluções ótimas. Já para instâncias maiores foi proposto um algoritmo *Hierarchical Tabu Search* (HTS) . O estudo indicou que ao oferecer a consistência da chegada ao cliente em 80% os custos tiveram pequenos aumentos.

Molina, Salmeron, *et al.* (2020) estudaram em seu trabalho o *Heterogeneous Vehicle Routing Problem With Time Windows and Limited Number of Resources* (HVRPTW-

LR), problema que trata a insuficiência de recursos para atender todos os clientes. Considerando a limitação de recursos esse modelo visa minimizar os custos de transporte e maximizar a quantidade de clientes atendidos . Para solucionar o problema é proposto o algoritmo *Variable Neighborhood Descent Tabu Search algorithm with Holding List* (VNDTS-HL). Resultados mostram que o algoritmo é robusto e tem boa performance em uma gama variada de problemas.

Ghannadpour e Zarribi (2019) estudaram o *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW) e propuseram uma formulação com busca a uma solução multiobjetivo. Os objetivos do primeiro cenário eram reduzir a quantidade de energia consumida pelos veículos e maximizar a satisfação dos clientes, e no segundo foram considerados apenas fatores tangíveis como a distância percorrida, a energia consumida pelo transportes e o custo com o eventual acréscimo de veículos alugados para complementar a frota.

No estudo realizado por Zhang, Qi, *et al.* (2015) foram consideradas várias restrições encontradas no mundo real. O problema estudado considerava múltiplos armazéns centrais, janelas de tempo além de tempo de atendimento a cada cliente. Os testes das instâncias foram realizados tanto em dados reais quanto em instâncias de benchmark. Os resultados encontrados pelos autores se mostraram bons e além disso o modelo desenvolvido foi avaliado como adaptável a outros problemas de roteirização de veículos.

Para solucionar um problema VRPTW multiobjetivo, Zhang, Yang, *et al* (2020) adotou um heurística com estratégia baseada em busca global e em busca local. Desta maneira atingiram o objetivo de reduzir a número de veículos necessários além de reduzir ao mínimo o tempo perdido devido a chegada antecipada a uma janela de atendimento.

Azadeh e Farrokih-Asl (2017) realizaram a combinação do problema *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), múltiplos depósitos, com um problema *Close-Open Mixed Vehicle Routing Problem* (COMVRP), o veículo pode ou não retornar ao seu ponto de partida. Foram utilizadas duas técnicas para solucionar o problema, a *Mixed Integer Programming* (MIP) e *Hardware based Genetic Algorithm* (HGA). Após

os testes com as duas técnicas a heurística mostrou melhores resultados, principalmente por seu tempo de execução mais baixo em instâncias maiores.

Kheri et al. (2019) em seu trabalho trataram de como alocar um equipamento caro e escasso para clientes em um cenário com janela de tempo. Em outras palavras, o problema trabalhado era sobre a criação de rotas nas quais era possível reduzir a quantidade de equipamento necessário para realizar as coletas e as entregas, além da redução das distâncias das rotas e da quantidade de veículos necessários para essa tarefa.

Já Ramos, Gomes e Póvoa (2020) realizaram estudos em um modelo de MDVRP no qual os havia armazéns entre as rotas, e desta maneira os veículos teriam a capacidade de recarregar sua capacidade sem retornar a sua origem. A fim de solucionar o instâncias consideradas grandes foi proposto pelos autores um metaheurística criada a partir da associação de uma *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) e de estratégia *relax-and-fit*. Dessa maneira segundo os autores foi possível executar de maneira eficiente instâncias de grande porte.

Naccache, Côté e Coelho (2018) estudaram entregas e coletas em grandes centros urbanos através da aplicação do *Multi-Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MPDVRPTW). Nesse trabalho os clientes eram atendidos por veículos já determinados. Foram realizados testes em instâncias de vários tamanhos e ao final foi destacado a diferença do desempenho da heurística criada frente ao modelo matemático.

Pan, Zhang e Lim (2021) realizaram um trabalho sobre o problema definido como *Duration Minimizing Time-Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows* (DM-TDVRPTW) através de uma heurística *Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search with Tabu Search* (ALNS-TS). Nesse estudo a frota era ilimitada e homogênea. O objetivo do modelo era minimizar o tempo total para realizar o atendimento de todos os clientes. Como resultado os autores concluíram que o algoritmo tem boa performance em problemas com de 50 a 100 clientes.

Dellaert, Van Woensel, *et al.* (2021) propuseram o estudo de um novo modelo chamado de *Multi-Commodity Two-Echelon Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MC-2E-VRPTW) . Com o objetivo de minimizar as distância percorrida nesse problema eles desenvolveram um algoritmo em C++. Por não haver na literatura problema de mesma natureza utilizaram instâncias de problema similar, emulando uma área urbana. Os resultados do estudo apontaram que o modelo de solução proposto para o problema de dois níveis é eficiente e eficaz, sendo capaz de resolver instâncias com 5 satélites intermediários e 100 clientes.

Bruglieri, Mancini e Pisacane (2019) introduzem um novo problema chamado de *Green Vehicle Routing Problem with capacitated Alternative Fuel Stations* (G-VRP-CAFS), no intuito de desenvolver um problema mais realista para os *Green Vehicle Routing Problems*. São desenvolvidas duas formulações de programação inteira , visando reduzir o tempo computacional para a resolução do problema. Foram obtidos bons resultados em tempo computacionais razoáveis.

Na Tabela 1 são apresentados as características dos artigos revisados, listados com informações sobre o método de solução, o ano e os autores.

Zare-Reisabadi e Hamid Mirmohammadi	2015	SDVRPST W	x	x					-	x			x				ILP (GAMS) , ACO , TS
Stavropoulou	2022	HConVRP	x	x		x											HTS, VND
Molina, Salmeron, <i>et al.</i>	2020	HVRPTW-LR	x													x	VNDTS-HL
Ghannadpour e Zarribi	2019	VRPTW	x													x	MILP (CPLEX), NSGA II
Zhang, Qi, et al	2015	Rich VRP	x														LocalSolver
Zhang, Yang, <i>et al</i>	2020	VRPTW	x														HMOEA-GL
Azadeh e Farrokih-Asl	2017	MDVRP															MIP (CPLEX), HGA
Kheri et al.	2019	Rich VRP	x														GA
Ramos, Gomes e Póvoa	2020	MDVRPI															Cplex, Python (Matheuristics)
Naccache, Côté e Coelho	2019	MPDPTW	x														Hybrid ALNS
Pan, Zhang e Lim	2021	DM-TDVRPTW	x														ALNS-TS
Dellaert, Van Woensel, <i>et al.</i>	2021	MC-2E-VRPTW	x														Algoritmo Branch and Price em C++
ieri, Mancini e Pisa	2019	G-VRP-CAFS															Arc-based MILP, Path-based MILP
Este Trablho	2022		x	x													MILP (Cplex)

Após a realização da extensa revisão da literatura foi possível assim avaliar que vários autores buscam sempre inovar e experimentar novos problemas avaliando e discutindo novas soluções para os problemas de transporte. Em base disso este novo problema foi proposto utilizando como base modelos já estudados.

Como apresentado na Tabela 1 existem trabalhos que versam sobre problemas de roteirização de veículos, com restrição de acesso ao cliente, com recarregamento intermediário, com janela de atendimento, coleta e entrega simultânea, múltiplas garagens, no entanto, não foram encontrados na literatura trabalhos que englobassem todas as características deste trabalho que realiza um estudo em um problema do tipo *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows* .

3 METODOLOGIA E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

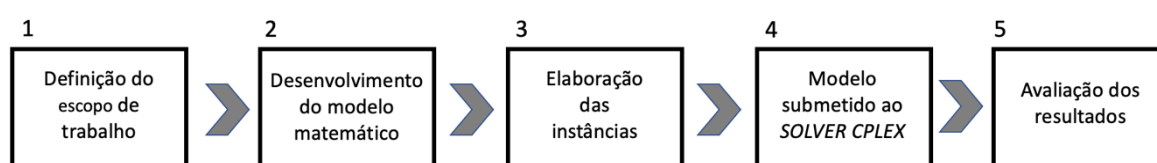
O objetivo deste capítulo é apresentar as etapas que foram desenvolvidas neste estudo. O motivo central desse trabalho é o planejamento em um problema de entrega e coleta de Resíduos no qual há restrições quanto ao tipo de veículo e a carga de caçambas presentes em clientes e janelas de atendimento.

Essa pesquisa foi realizada a partir do desenvolvimento de um modelo matemático que visa reduzir a quantidade de veículos e a distância percorrida por eles a fim de realizar todas as coletas e entregas respeitadas as restrições. Este modelo considera múltiplas garagens para a partida dos veículos, múltiplos pátios para carregamento de caçambas vazias, múltiplos aterros para a destinação dos resíduos, frota heterogênea com capacidade limitada de caçambas e janela de atendimento.

3.1 ETAPAS DESENVOLVIDAS

Para a realização deste trabalho foram necessárias 5 etapas apresentadas na Figura 6.

Figura 6-Etapas desenvolvidas



Fonte : Autor

3.1.1 O Problema Analisado

Uma empresa que oferece soluções tecnológicas para a gestão de resíduos está em busca de criar um modelo para gerir frotas de veículos de maneira eficiente, utilizando sempre a menor quantidade possível de veículos e percorrendo a menor distância possível. O veículos utilizado para esse transporte é o caminhão tipo poliguindaste e pode ser visto em operação na Figura 7.

Os veículos sairão de múltiplas garagens para entregar caçambas vazias e coletar caçambas cheias nos clientes. Para a realização das entregas de caçambas os veículos após iniciarem sua rota devem primeiramente buscar caçambas vazias em um pátio antes de iniciar a entrega. E para esvaziar as caçambas cheias coletadas os veículos devem se dirigir a um aterro. Para esse estudo a empresa forneceu dados com os quais foram possíveis a elaboração de dados para as instâncias. Os veículos ao final da rota sempre vão para a garagem mais próxima do ultimo cliente ou aterro, e são posicionados na garagem que lhes confere a menor rota para o próximo dia durante o período do dia não considerado nesse trabalho. O modelo é estático, dessa forma depois de um roteamento iniciado ele não se adaptará a novas demandas que possam surgir.

Figura 7- Caminhões Poliguindastes em atendimento ao Cliente



Fonte : Autor

Para buscar maior adequação a realidade foram considerados 3 modelos de veículos poliguindastes, com diferentes chassis e consequentemente com diferentes capacidades de içar caçambas de diferentes pesos, diferentes velocidades médias e custos. A fins deste trabalho a capacidade do chassis do veículo é respeitada baseando-se nas instâncias, não especificando qual a carga de cada caçamba, desta maneira apenas limitando em algumas instâncias o veículo de atender um cliente que tenha cargas mais pesadas, que seriam detectadas pelo sensor das caçambas.

3.1.2 Elaboração do modelo matemático

Definido o objeto de estudo deste trabalho foi realizada a fundamentação teórica, objetivando a criação do modelo adequado ao problema estudado. Para isso esse modelo deveria levar em consideração, múltiplos veículos heterogêneos partindo de múltiplas garagens, visando o atendimento de todos os clientes, utilizando-se de pátios e aterros entre atendimentos para obtenção de novas caçambas e destinação dos resíduos, período de atendimento individualizado por cliente.

Tendo como base os estudos e as informações cedidas pela empresa que fornece soluções tecnológicas para transporte de resíduos, foi elaborado um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista (MILP) , que é apresentado no Capítulo 4, para solucionar o *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows*, utilizando a menor quantidade de veículos e percorrendo a menor distância possível.

3.1.3 Instâncias de teste

Para esse trabalho foram elaboradas 20 instâncias teóricas, para testar o modelo matemático proposto. As instâncias foram elaboradas com base em informações levantadas com a empresa que oferece a soluções em tecnologia para transporte de resíduos, no entanto não são instâncias reais. As instâncias foram elaboradas de maneira emular uma área de atuação similar é a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV), composta pelos municípios de Cariacica, Fundão, Guarapari, Serra, Viana, Vila Velha e Vitória com área de 2.331 Km² (GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO, 2005).

Governo do Estado do Espírito Santo - Secretaria de Estado de Economia e Planejamento – (Sep) Instituto De Apoio à Pesquisa e ao Desenvolvimento Jones dos Santos Neves – (Ipes)

Três modelos de veículos poliguindates foram considerados com os seguintes parâmetros: O modelo 1 tem velocidade média de 25 km/h, custo de R\$ 2756,25 por sua utilização e de R\$ 2,17 por km rodado. O modelo 2 por sua vez tem velocidade média de 27 km/h, custo de R\$ 2957,43 por sua utilização e de R\$ 1,94

por km rodado. Por fim o modelo 3 por sua vez tem velocidade média de 30 km/h, custo de R\$ 2871,28 por sua utilização e de R\$ 2,08 por km rodado. Os dados são organizados na Tabela 2.

Tabela 2- Parâmetros dos Modelos de Veículos

Custo (R\$)					
Tipo Caminhão	Fixo	Diário	Por Km	Velocidade (km/h)	
Modelo 1	2756,25		2,17	25	
Modelo 2	2957,43		1,94	27	
Modelo 3	2871,28		2,08	30	

Fonte : Autor

Neste modelo matemático, todos os veículos em todas as instâncias tem capacidade de carregar 4 caçambas, cheias ou vazias, o tempo para movimentar cada caçamba foi definido como 6 minutos . Outras características das instâncias são apresentadas na Tabela 3

Tabela 3- Características das Instâncias

Grupo	Instância	Qtd Garagens	Nº Clientes	Demanda entrega Caçambas VAZIAS	Demanda Coleta Caçambas CHEIAS	Pátios	Aterros	Veículo Modelo1	Veículo Modelo2	Veículo Modelo3	Período de atendimento dos clientes (h)	Caçambas incompatíveis com veículos ? Acesso
1	1		6	10	10							
	2		8	18	10							
	3	2	10	17	18	2	2	1	2	1	8	Não
	4		12	19	22							
2	5		8	18	10							
	6		6	10	10							
	7	2	8	12	19	2	2	1	2	1	8	Sim
	8		10	18	11							
3	9		12	21	22							
	10		8	18	10							Não
	11		10	17	18							Não
	12	4	8	12	19	2	2	1	2	1	8	Sim
4	13		10	10	18							Sim
	14	2	6	18	10							Não
	15	2	6	18	10							Não
	16	4	6	18	10							Não
	17	2	8	12	19	2	2	1	2	1	2	Sim
	18	4	8	12	19							Sim
5	19	4	10	10	18							Sim
	20	5	12	19	22	3	3	2	2	2	8	Não
	21	5	12	21	22							Sim

Fonte : Autor

As instâncias do Grupo 1 são instâncias menores para avaliar o funcionamento do modelo. Elas possuem 2 pátios para recarregamento de caçambas vazias, e 2 aterros para esvaziamento das caçambas cheias considerando que cada pátio e aterro pode ser visitado até duas vezes por cada veículo. Nestas instâncias 4 veículos estão disponíveis para o roteamento além de duas garagens para início e término do roteamento. Os períodos de atendimento aos clientes não são definidos e a jornada de trabalho dos veículos é de 8 horas por dia. As instâncias 1,2,3 e 4 se diferenciam pela quantidade de clientes e suas demandas. Não a consideração a restrição de um veículo operar caçambas de um cliente nessa instância.

O Grupo 2 composto, pelas instâncias 5,6,7,8 e 9 tem o objetivo de avaliar como o modelo se comporta ao incluir a restrição de veículos operarem em certos clientes, considerado nesse trabalho a restrição ao chassi do veículo de içar e transportar as caçambas daquele cliente devido a seu peso. Tem a instância 5 como modificação da instância 2 em um cenário com a restrição aplicada.

O Grupo 3 por sua vez é formado pelas instâncias 10,11,12 e 13. Nesse conjunto o objetivo é avaliar como a disponibilidade de garagens modifica o comportamento do modelo. São consideradas 4 garagens para início e fim da rotas dos veículos. A instância 10 é uma modificação da instância 2 que nesse cenário tem 4 garagens.

O grupo 4 é composto pelas instâncias 14,15,16,17,18 e19. Nesse grupo é avaliado como a definição de período de atendimento influencia o modelo. Foi estipulado uma faixa de 2h para cada cliente podendo elas coincidirem entre si ou não. Para isso foram criadas instâncias baseadas nas instâncias dos grupos anteriores. A 14 baseada na 2 do grupo 1, As Instância 15 e 17 com as Instâncias 5 e 7 do grupo 2, e as instâncias 16,17 e 18 com as Instâncias 10,12 e 13 respectivamente.

Por fim as instâncias do Grupo 5 são instâncias com 6 veículos, 5 garagens, 3 aterros e 3 pátios. Feitas para avaliar o comportamento do modelo em instancias maiores. A instância 19 e 20 são formuladas sobre as instâncias 4 e 9 respetivamente.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

O modelo matemático proposto tem o objetivo de reduzir o custo total de transporte reduzindo a quantidade de veículos e a distância percorrida por eles . Para tanto devem ser conhecidas as demandas de coleta e entrega de caçambas, os períodos de atendimento, e o tamanho das caçambas nos clientes responsáveis por definir a compatibilidade do tipo de veículo aceita no cliente. Também devem ser conhecidos a quantidade de garagens onde os veículos podem partir e a quantidade de pátios e aterros. A partir dessas informações, o modelo irá definir a rota que deve ser percorrida por cada veículo. De onde ele deve partir, onde deve se carregar de caçambas vazias, onde deve coletar as cheias e em qual aterro ele deve esvaziá-las.

Este modelo proposto se diferencia de demais trabalhos por considerar múltiplas garagens iniciais para os veículos, considerar que o veículo retorna para a garagem mais próxima ao final de sua rota, período de atendimento específico por cliente , capacidade de recarregamento de caçambas em pátios localizados em pontos especiais, e de esvaziamento de caçambas em aterros.

Para a realização desse planejamento é proposto um modelo inspirado em *Site Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP)*, *Vehicle Routing with Simultaneous Pickup and Delivery (VRSPD)* , *Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)* , *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities (VRPIRF)* e *Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)* .

No Capítulo 1 Introdução, foi descrita como este problema estudado foi adaptado ao *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows*. Esse modelo fornece, quando há possíveis soluções frente as restrições, o conjunto de rotas na qual é necessário a menor quantidade de veículos e na qual a menor distância possível é percorrida, para realizar a coleta e a entrega simultânea de caçambas. Nesse modelo são considerados período de atendimento aos clientes , jornada diária de trabalho dos motoristas dos veículos, pátios onde os veículos podem coletar caçambas vazias, aterros onde são esvaziadas as caçambas cheias, considerando que ao final da rota os veículos se dirigem para a garagem mais

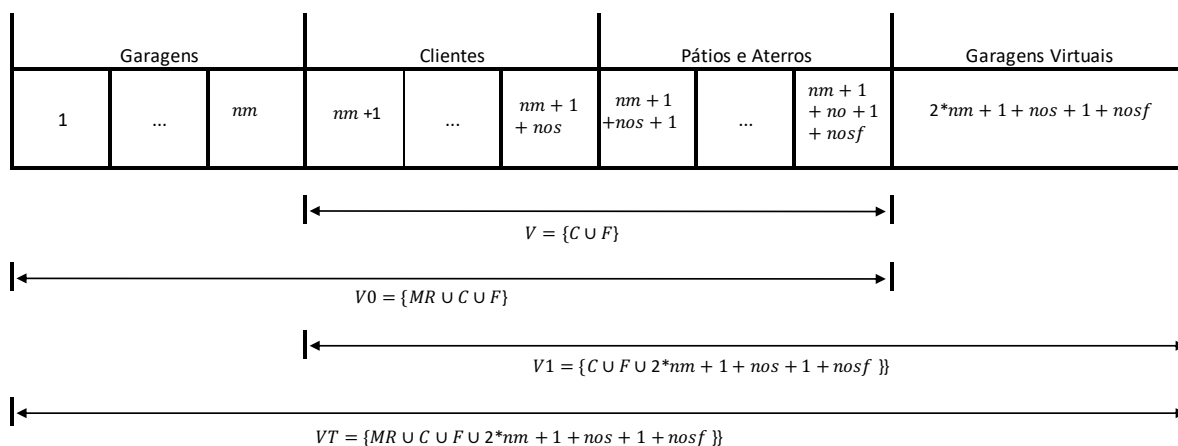
próxima. Utilizando dos pátios e aterros os veículos realizam entregas e coletas se limitados pela jornada diária, podendo assim atender vários clientes em uma mesma rota. Existe limitação de viagens a pátios e aterros. Os veículos partem de seus pontos de partida sem caçambas e vão aos pátios a fim de carregar de caçambas vazias. Cada cliente é atendido por apenas um único veículo

Considerando nos , a quantidade de clientes, nm , a quantidade de garagens, $nosf$, a quantidade de aterros e pátios, nv , a quantidade de veículos da frota. ntv , a quantidade tipos de veículos frota A Função Objetivo (FO), minimiza a quantidade de veículos utilizados, a distância percorrida, e quantidade de caçambas carregadas em cada veículo (de maneira que ao passar em um pátio o veículo apenas carregue a quantidade necessária). Assim o modelo matemático é apresentado a seguir nas seguintes partes: conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão, função objetivo e restrições.

Conjuntos:

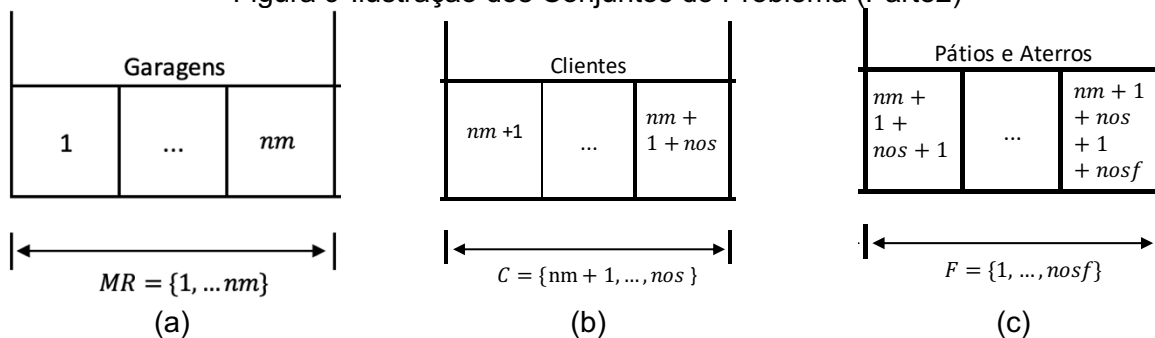
C	Conjunto de clientes	$C \in \{nm + 1, \dots, nos\}$
V	Conjunto de clientes aterros e pátios	$V \in \{nm + 1, \dots, nm + nos + nosf\}$
$V0$	Conjunto de garagens, clientes aterros e pátios	$V0 \in \{1, \dots, nm + nos + nosf\}$
$V1$	Conjunto de clientes, aterros , pátios e garagens virtuais	$V1 \in \{nm + 1, \dots, 2 * nm + nos + nosf\}$
VT	Conjunto de garagens, clientes, aterros , pátios e garagens virtuais	$VT \in \{1, \dots, 2 * nm + nos + nosf\}$
MR	Conjunto de garagens	$MR \in \{1, \dots, nm\}$
F	Conjunto de aterros e pátios	$F \in \{1, \dots, nosf\}$
K	Conjunto de veículos	$K \in \{1, \dots, nv\}$
TV	Conjunto de tipo de veículos	$TV \in \{1, \dots, ntv\}$

Figura 8- Ilustração dos Conjuntos do Problema (Parte1)



Fonte : Autor

Figura 9-Ilustração dos Conjuntos do Problema (Parte2)



Fonte : Autor

Parâmetros:

$dis_{i,j}$ Distância entre garagens, clientes , aterros e pátios $i, j \in VT$

Ck_k Custo fixo do veículo $k \in K$

Cd_k Custo por km percorrido do veículo $k \in K;$

wti_i Janela de tempo inicial $i \in VT$

wtf_i Janela de tempo final $i \in VT$

vt_j	Tipo do veículo	$j \in K$;
q_j	Capacidade total de transporte de caçambas por veículo	$j \in K$;
vl_j	Velocidade média desenvolvida pelo veículo	$j \in K$
vtc_{iv}	Restrição ao tipo de veículo de transportar caçambas do cliente devido ao peso	$i \in C$ e $v \in TV$
de_i	Demanda de entrega de caçambas vazias	$i \in VT$
dc_i	Demanda de coleta de caçambas cheias	$i \in VT$
tf_i	Tipo do nó auxiliar pátio ou aterro	$i \in F$
λ	Peso atribuído a primeira parcela da FO	$\lambda=10$
δ	Peso atribuído a segunda parcela da FO	$\delta=100$
μ	Peso atribuído a terceira parcela da FO	$\mu = 0,1$
M	Constante positiva de valor grande,	$M = 9999,99$;

Neste trabalho não foi realizada análise de sensibilidade, para o peso das parcelas, sendo desta forma atribuídos valores empíricos. O λ peso atribuído a primeira parcela da Função Objetivo, estabelecido como 10, com a finalidade de dar peso ao custo do quilômetro percorrido por cada veículo ; δ peso atribuído a segunda parcela da Função Objetivo, estabelecido como 100, com a finalidade de atribuir maior peso ao custo por utilização de veículo; μ peso atribuído a terceira parcela da Função Objetivo, estabelecido como 0,1, para reduzir o peso da utilização de uma quantidade menor de caçambas carregadas em um veículo.

Variáveis de decisão:

$x_{i,j,k}$	variável binária com valor “1” caso o veículo $k \in K$ percorra o arco $i, j \in VT$ e de valor “0” caso contrário.
$tC_{i,k}$	variável tempo de chegada do veículo $k \in K$ a um cliente, aterro , pátio ou garagem $i \in VT$.
$dis_{i,j}$	Arco de distância entre dois nós (Cliente, garagem, aterros ou pátios)
$ev_{i,k}$	variável que indica a quantidade de caçambas vazias que estão no veículo $k \in K$ enquanto em cliente, aterro , pátio ou garagem $i \in VT$ para entrega.
$cc_{i,k}$	variável que indica a quantidade de caçambas cheias que estão no cliente, aterro ,pátio ou garagem $i \in VT$ a serem coletadas pelo veículo $k \in K$.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } & \lambda \sum_{i \in VT} \sum_{j \in VT | i \neq j} \sum_{k \in K} cd_k x_{i,j,k} dis_{i,j} + \delta \sum_{k \in K} ck_k \sum_{j \in V} \sum_{dr \in MR} x_{dr,j,k} \\ & + \mu \sum_{i \in VT} \sum_{k \in K} ev_{i,k} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V1} \sum_{k \in K | j \neq nm+1} x_{nm+i,j,k} = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in V1} \sum_{k \in K | j \neq nm+nos+f} x_{nm+i,j,k} \leq 1 \quad \forall f \in F \quad (3)$$

$$\sum_{i \in MR} \sum_{j \in V1} x_{i,j,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in V0 | i \neq hc} x_{i,hc,k} - \sum_{j \in V1 | j \neq hc} x_{i,hc,k} = 1 \quad \forall hc \in V, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V0} \sum_{dv \in MR} x_{i,nm+nos+nosf+dv,k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$0 \leq x_{i,j,k} \leq 1 \quad \forall i \in VT, j \in VT, k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in VT} \sum_{dv \in MR} x_{nm+nos+nosf+dv,j,k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{i \in VT} \sum_{dr \in MR} x_{i,dr,k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$tc_{j,k} \geq tc_{i,k} + (dis_{i,j}/vl_k) * x_{i,j,k} - (M * (1 - x_{i,j,k})) \quad \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \quad (10)$$

$$tc_{j,k} \geq tc_{i,k} + (ot * (ev_{i,k} + cc_{i,k}) + (dis_{i,j}/vl_k) * x_{i,j,k} - (M * (1 - x_{i,j,k}))) \quad \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \quad (11)$$

$$tc_{j,k} \geq tc_{i,k} + (ot * (q_k - ev_{i,k} - cc_{i,k}) + (dis_{i,j}/vl_k) * x_{i,j,k} - (M * (1 - x_{i,j,k}))) \quad \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \quad (12)$$

$$ev_{i,k} + cc_{i,k} \leq q_k \quad \forall i \in VT, k \in K \quad (13)$$

$$tc_{i,k} \geq wti_i * \sum_{j \in V1} x_{i,j,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \quad (14)$$

$$tc_{i,k} \leq wtf_i * \sum_{j \in V1} x_{i,j,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \quad (15)$$

$$tc_{nm+nos+nosf+dv,k} \geq wti_{nm+nos+nosf+dv} * \sum_{i \in V0} x_{i,nm+nos+nosf+dv,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \quad (16)$$

$$tc_{nm+nos+nosf+dv,k} \leq wtf_{nm+nos+nosf+dv} * \sum_{i \in V0} x_{i,nm+nos+nosf+dv,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \quad (17)$$

$$\sum_{j \in V1} \sum_{k \in K} \sum_{dr \in MR} x_{dr,j,k} \geq 1 \quad \forall j \in V1, k \in K, dr \in MR \quad (18)$$

$$\sum_{j \in V1} \sum_{k \in K} \sum_{dr \in MR} x_{dr,j,k} \leq nv \quad \forall j \in V1, k \in K, dr \in MR \quad (19)$$

$$x_{i,i,k} \geq 1 \quad \forall i \in VT, k \in K \quad (20)$$

$$ev_{i,k} = 0 \quad \forall i \in MR, k \in K \quad (21)$$

$$cc_{i,k} = 0 \quad \forall i \in MR, k \in K \quad (22)$$

$$ev_{j,k} \leq q_k + M * (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in MR, j \in V, k \in K \quad (23)$$

$$cc_{j,k} \geq cc_{j,k} - M * (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in MR, j \in V, k \in K \quad (24)$$

$$cc_{j,k} \leq cc_{j,k} + M * (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in MR, j \in V, k \in K \quad (25)$$

$$ev_{j,k} \geq ev_{i,k} - M * (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in MR, j \in V, k \in K \quad (26)$$

$$ev_{j,k} \leq ev_{i,k} + M * (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in MR, j \in V, k \in K \quad (27)$$

$$ev_{j,k} \leq ev_{i+nm,k} - de_{i+nm} + M * (1 - x_{i+nm,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (28)$$

$$ev_{j,k} \geq ev_{i+nm,k} - de_{i+nm} - M * (1 - x_{i+nm,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (29)$$

$$cc_{j,k} \leq cc_{i+nm,k} + dc_{i+nm} + M * (1 - x_{i+nm,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (30)$$

$$cc_{j,k} \geq cc_{i+nm,k} + dc_{i+nm} - M * (1 - x_{i+nm,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (31)$$

$$ev_{j,k} \leq q_k - (ev_{i+nm+nos,k} + cc_{i+nm+nos,k}) + M * (1 - x_{i+nm+nos,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (32)$$

$$ev_{j,k} \geq cc_{i+nm+nos,k} + ev_{i+nm+nos,k} - M * (1 - x_{i+nm+nos,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (33)$$

$$cc_{j,k} \leq 0 + M * (1 - x_{i+nm+nos,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (34)$$

$$cc_{j,k} \geq 0 - M * (1 - x_{i+nm+nos,j,k}) \quad \forall i \in C, j \in V1, k \in K \quad (35)$$

$$cc_{nm+nos+nosf+dv,k} = 0 \quad \forall k \in K, dv \in MR \quad (36)$$

$$ev_{nm+nos+nosf+dv,k} \leq cc_{i,k} + ev_{i,k} + M * (1 - x_{nm+nos+nosf+dv,k}) \quad \forall i \in V, k \in K, dv \in MR \quad (37)$$

$$ev_{nm+nos+nosf+dv,k} \geq cc_{i,k} + ev_{i,k} - M * (1 - x_{nm+nos+nosf+dv,k}) \quad \forall i \in V, k \in K, dv \in MR \quad (38)$$

$$\sum_{j \in VT} x_{nm+i,j,k} = 0 \quad \forall c \in C, k \in K \quad (39)$$

$$x_{i,j,k} = 0 | j \geq 1 \wedge j \leq nm + nos \quad \forall i \in MR, j \in VT, k \in K \quad (40)$$

$$x_{i,j,k} = 0 | j \geq n, +nos + 1 \wedge j \leq nm + nos + nosf \quad \forall i \in MR, j \in VT, k \in K \quad (41)$$

A Função Objetivo do modelo matemático é dada pela equação (1). Ela é dividida em 3 partes, a primeira parte representa o custo total por distância percorrida por todos os veículos utilizados; a segunda parte representa o custo total pela utilização dos veículos. Já a terceira parcela é responsável por fazer que ao coletar caçambas vazias sejam coletadas a menor quantidade possível a fim de atender as entregas.

A restrição (2) garante que cada cliente i seja atendido por apenas um único veículo k . Já a restrição(3) garante que cada aterro ou pátio seja visitado por um mesmo veículo k apenas uma única vez, considerando que tanto os pátios quanto aterros são criados múltiplas vezes a fim de permitir múltiplas passagens. As restrição (4)

indica que todo veículo sai da garagem inicial. A restrição (5) é responsável por não permitir a viagem de um nó para ele mesmo. Já a restrição (6) indica que o veículo chega na garagem virtual, mesmo que não tenha passado por nenhum outro nó. Já a restrição (7) indica que $x_{i,j,k}$ é valor entre 0 e 1 tornando uma variável binária. A restrição (8) é responsável por não permitir que existam rotas que partam da garagem virtual. A restrição (9) indica que não existam rotas que retornem a garagem inicial. As restrições (10), (11) e (12) são para indicar a restrições do momento de chegada para o atendimento. A primeira faz que o tempo de chegada em um nó posterior sempre é maior que o tempo de partida. A segunda que esse tempo deve ser acrescido do tempo para carregar e descarregar as caçambas, bem como a terceira que considera o acréscimo desse tempo quando o veículo está em um pátio ou aterro. A restrição(13) diz que a capacidade de um veículo k é a soma das caçambas cheias e das vazias.

A restrição (14) tem como premissa que o tempo de chegada do veículo k para atendimento em um nó deve respeitar o período inicial definido. Por sua vez a restrição (15) indica que esse veículo deve chegar e operar antes do período final de atendimento do nó. A restrição (16) indica que o tempo de chegada no nó virtual é maior que o tempo inicial e a (17) que é menor que o período final de atendimento. A restrições (18) e (19) dizem que é necessário ao menos 1 veículo para realizar o atendimento e que nó máximo podem ser utilizados nv veículos para a solução. A restrição (20) diz que nunca há um arco entre um nó e ele mesmo para nenhum veículo k . As restrições (21) e (22) dizem que a demanda de entrega vazia e coleta de caçambas cheias é zero nas garagens. A restrição (23) faz com que a entrega de caçambas vazias seja sempre menor ou igual a capacidade de caçambas do veículo. A as restrições (24) e (25) indicam que ao chegar em um nó todas as caçambas coletadas devem estar no veículo. As restrições (26) e (27) fazem com que as caçambas vazias entregues em um nó não retornem ao veículo.

As restrições (28) e (29) faz com que as caçambas em um veículo sejam deduzidas pela quantidade de sua demanda, bem como as restrições (30) e (31) fazem com que em um determinado nó a capacidade de um veículo é preenchida pela sua demanda de coleta. Já a restrição (32) define que ao passar em um pátio o veículo k

é carregado com caçambas vazias pela diferença capacidade pela soma da entrega de vazias e coleta de cheias. As restrições (33),(34) e (35) se referem a passagem do veículo em um aterro onde sua capacidade de entregar vazias se torna igual a todas a caçambas cheias agora esvaziadas mais as que estavam vazias ao chegar no aterro, e o carregamento de caçambas vazias é zerado. Restrição (36) faz com que a quantidade de caçambas vazias na garagem virtual seja zero, as restrições (37) e (38) fazem com que a capacidade de entregar vazias na garagem virtual seja igual a soma das coletas e entregas.

A restrição (39) da conta que apenas o tipo de veículo compatível com as caçambas do cliente pode atendê-lo. Por fim a restrição (40) faz com que o veículo passe um pátio antes de ir para um cliente , já a restrição (41) se o veículo está em um pátio ou em um aterro ele não vai para outro pátio ou aterro na sequência.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados das instâncias elaboradas submetidas ao modelo matemático proposto no Capítulo 4.

O modelo foi testado utilizando *solver* IBM ILOG CPLEX®, versão 22.1 em um computador Intel Xeon Silver 4116, 2 processadores de 2.10 GHz com 16 núcleos, 128 GB de memória RAM. Todas as instâncias foram executadas por 12 horas, 43200 segundos. Este tempo foi definido visando sua aplicabilidade como ferramenta de planejamento em uma operação real.

Assim os resultados obtidos são demonstrados na Tabela 4. A coluna FO representa o valor encontrado na Função Objetivo. A coluna UB apresenta o *Upper Bound*, a LB o *Lower Bound* e a coluna *Gap* apresenta a distância entre elas em valor percentual. Por fim a coluna TE representa o Tempo de execução do CPLEX para cada instância. Informações sobre a execução no CPLEX são apresentados no Apêndice A.

Tabela 4 - Resultados das Instâncias no CPLEX

Grupo	Instância	FO	UB	LB	Gap(%)	TE(s)
1	1	2,78E+05	2,78E+05	2,78E+15	0.00%	6078.06
	2	2,90E+05	2,90E+05	2,94E+13	98.99%	43206.44
	3	3,00E+05	3,00E+05	3,73E+13	98.77%	43206.84
	4	-	-	-	-	43201.04
2	5	5,67E+05	5,67E+05	4,23E+13	99.25%	43205.67
	6	5,65E+05	5,65E+05	5,65E+15	0.00%	388.95
	7	5,67E+05	5,67E+05	5,65E+15	99.11%	43203.95
	8	5,67E+05	5,67E+05	2,68E+13	99.53%	43204.03
	9	-	-	-	-	
3	10	2,90E+05	2,90E+05	2,89E+13	99.00%	43206.13
	11	5,68E+15	5,68E+15	3,59E+13	99.37%	43207.11
	12	5,67E+05	5,67E+05	3,69E+03	99.22%	43245.98
	13	-	-	-	-	
4	14	5,67E+05	5,67E+05	5,67E+05	0.00%	796.30
	15	5,67E+05	5,67E+05	5,67E+05	0.00%	150.41
	16	5,77E+05	5,77E+05	5,77E+05	0.00%	17.39
	17	5,66E+05	5,66E+05	5,66E+05	0.00%	1401.19
	18	5,76E+05	5,76E+05	4,68E+10	99.19%	43206.59
5	19	5,67E+15	5,67E+15	5,67E+15	99.57%	796.30
	20	5,75E+15	5,75E+15	3,16E+13	99.42%	43213.64

Fonte : Autor

5.1 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO MODELO

Considerando o hardware utilizado e o tempo definido para execução das instâncias o CPLEX foi capaz de encontrar soluções ótimas para as instâncias 14, 16, 17 e 18. Já para as instâncias 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 12, 19 e 20 foram encontradas soluções diferentes da ótima. Os *Gaps* ficaram entre 98,77% e 99,57% com este tempo definido como operacionalmente viável para a utilização desse modelo. Por fim as instâncias 4, 9, 11, 13 e 15 não obtiveram soluções pelo solver. As instâncias do Grupo 4 tinham por objetivo mostrar o impacto das janelas em problemas com e sem restrição de acesso, e se mostraram as com melhor tempos de execução devido a redução das possíveis combinações para atendimento dos clientes e assim do espaço de soluções das instâncias.

O modelo foi capaz de criar rotas para os veículos respeitando as restrições do problema, facilitando o planejamento de rotas dos tomadores de decisão. Gerar um planejamento dessas rotas de maneira não computacional poderia ser além de mais complexo gerar resultados ainda mais distantes do ótimo. Ao avaliar em especial as instâncias sem resultado há de se considerar em trabalho futuras a modificação do modelo para que ela permita o atendimento de apenas parte dos clientes, de maneira que o *solver* sempre forneça alguma solução mesmo que parcial do problema.

5.2 ANÁLISE OPERACIONAL DOS RESULTADOS DAS INSTÂNCIAS

Em sua maioria, as instâncias elaboradas nesse trabalho tem características similares, como a utilização da mesma quantidade de veículos e dos mesmo modelos em suas instâncias. As modificações se dão principalmente na quantidade de clientes, de pátios e aterros considerados além do período de atendimento dos clientes e da restrição de acesso. Sendo comparáveis essas instâncias optou-se a avaliar os resultados mesmo que com os *gaps* altos. Os resultados operacionais são compilados na , que apresenta informações sobre a quantidade e modelos de veículos utilizados, o custo total por utilização dos veículos, o somatório das distâncias percorrida pelos veículos utilizados e o custo total considerando a

utilização dos veículos mais o custo de distância percorrido pelos veículos multiplicado pelo seu respectivo custo de cada instância.

Tabela 5- Resultados Operacionais

Grupo	Instância	Quantidade de veículos Utilizados			Custo Total por Utilização	Distância total Percorrida (Km)	Custo total (R\$)
		Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3			
1	1	1	0	0	2756,25	103,20	2980,19
	2	0	0	1	2871,28	155,07	3193,83
	3	0	1	0	2957,43	215,06	3374,65
	4	-	-	-	-	-	-
2	5	1	0	1	5713,68	208,71	6160,57
	6	1	0	1	5713,68	79,84	5881,53
	7	1	0	1	5713,68	196,81	6128,11
	8	1	0	1	5713,68	204,69	6151,11
	9	-	-	-	-	-	-
3	10	0	0	1	2871,28	143,00	3148,70
	11	1	-	1	5713,68	240,93	6225,61
	12	1	1	0	5713,68	175,50	6074,41
	13	-	-	-	-	-	-
4	14	1	0	1	5627,53	252,16	6157,24
	15	1	0	1	5627,53	195,42	6043,31
	16	1	1	0	5713,68	281,49	6190,02
	17	1	1	0	5713,68	138,81	6004,11
	18	1	1	0	5713,68	234,64	6193,76
5	19	1	0	1	5627,53	173,96	5992,60
	20	1	0	1	5627,53	197,86	6045,94

Fonte : Autor

Nos capítulos seguintes são apresentadas as rotas das instâncias com resultados. Para cada um dos grupos de instâncias é apresentada uma representação gráfica da rota.

5.2.1 Resultados instâncias Grupo 1

Neste grupo foi definido a utilização de 2 garagens para os veículos, 2 pátios e 2 aterros, sendo possível realizar duas passagens em cada um desses pátios e aterros. Foram atribuídos 6,8,10 e 12 Clientes respectivamente para as Instâncias 1,2,3 e 4. Não há restrição de atendimento de um cliente por veículo e período de atendimento é de 8 horas para todos. Nessas condições apenas a instância 4 não obteve solução. A Figura 10 apresenta esquematicamente as rotas da Instância 2.

Tabela 6- Descritivo resultados Grupo 1

Instância 1

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	103,20	0 14 2 5 10 6 9 3 4 7 8 16 16
Veículo 2	2	0	0 16
Veículo 3	2	0	0 16
Veículo 4	3	0	0 16

Instância 2

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	0,00	0 18
Veículo 2	2	0,00	0 18
Veículo 3	2	0,00	0 18
Veículo 4	3	155,07	0 16 4 6 13 5 12 9 10 8 15 2 7 17 3 10 18

Instância 3

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	0,00	0 20
Veículo 2	2	0,00	0 20
Veículo 3	2	215,06	1 18 5 11 15 9 2 19 6 16 3 17 10 12 8 14 7 4 13 20
Veículo 4	3	0,00	0 20

Legenda

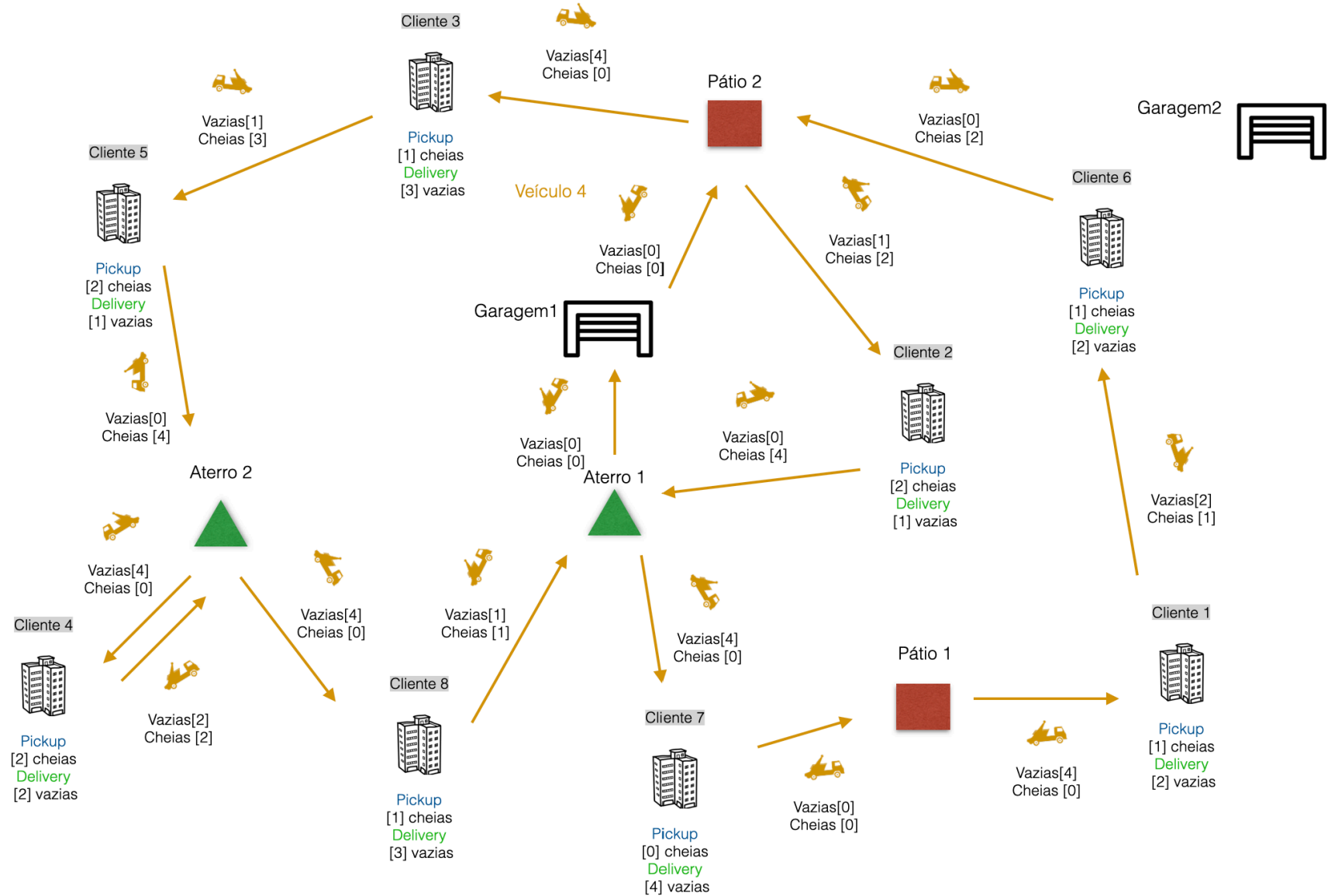
 Garagem	 Pátio	 Aterro	 Cliente
---	---	--	---

Fonte : Autor

Na Tabela 6 vemos que em com o tempo de 8h para atendimento e com a disponibilidade de pátios e aterros foram encontradas soluções para as instâncias na qual apenas um veículo foi utilizado. Atendendo a premissa do modelo de reduzir a utilização de veículos visando a redução de custos quando possível. Um observação importante é que todos os tipos de veículos são utilizados e na instância 3 a qual a maior distância é percorrida o veículo 3 que possui o maior custo fixo e o menor por distância se torna viável.

Na Figura 10 é apresentada a representação da solução encontrada para a instância 2. O veículo 4 é o único utilizado nessa solução e ele inicia a sua rota partindo garagem 1 em direção ao pátio 2 onde ele é carregado com caçambas vazias. Após isso o veículo 4 inicia seu atendimento no cliente 3 onde são entregue três caçambas vazias e é coletada uma caçamba cheia. Na sequência o veículo 4 se direciona ao cliente 5 onde são coletadas mais 2 caçambas cheias e é entregue uma caçamba vazia. Ao sair do cliente 5 o veículo se direciona a sua primeira passagem no pátio 2, onde as caçambas cheias do veículo são esvaziadas e o veículo volta a transportar apenas caçambas vazias. Após isso o veículo 4 se direciona ao cliente 4 onde são entregues duas caçambas vazias e coletadas duas caçambas cheias. Em seguida o veículo retorna para sua segunda passagem no pátio 2 onde são novamente esvaziadas as caçambas que estão cheias no veículo. Na sequência o veículo continua sua rota e vai ao atendimento do cliente 8 onde é coletada uma caçamba vazia e são entregues 3 caçambas vazias. O veículo 4 então vai ao aterro 1 onde novamente é esvaziada as caçambas cheias. A seguir o veículo atende o cliente 7 onde são entregues quatro caçambas vazias. O veículo vai em direção ao pátio 1 onde o veículo 4 é novamente carregado com 4 caçambas vazias. Após o carregamento o veículo atende o cliente 1 e coleta uma caçamba cheia e entrega duas caçambas vazias. Ainda em sua rota o veículo atende o cliente 6 coletando 1 caçamba vazia e entregando duas caçambas cheias. O Veículo então passa pela segunda vez pelo pátio 2 e coleta uma caçamba vazia que será entregue ao cliente 2. Ao passar no cliente 2 o veículo entrega a caçamba vazia faz a coleta das ultimas caçambas cheias e se direciona para sua segunda passagem pelo aterro 1, onde as caçambas são esvaziadas e o veículo segue para o fim da rota na garagem sem caçambas em sua carroceria.

Figura 10- Representação Gráfica Instância 2



5.2.2 Resultados instâncias Grupo 2

No Grupo 2 foram testadas 5 instâncias sendo a Instância 5 baseada na instância 2 para ser possível avaliar o comportamento do modelo ao ser definida restrições de clientes serem atendidos por determinados tipos de veículos. Assim como no grupo anterior foram criadas instâncias com diferentes quantidades de clientes mas mantendo as características de veículos, pátios e aterros. Ao instituir restrições de atendimento o modelo decidiu pela utilização de mais veículos, de forma a ser possível realizar o atendimento.

Tabela 7- Descritivo resultados Grupo 2

Instância 5

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	141,96	0 16 4 13 9 11 8 10 5 7 17 3 15 18
Veículo 2	2	0,00	0 18
Veículo 3	2	0,00	0 18
Veículo 4	3	66,75	0 14 2 6 12 19

Instância 6

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	19,56	0 12 2 3 9 17
Veículo 2	2	0,00	0 16
Veículo 3	2	0,00	0 16
Veículo 4	3	60,29	0 13 7 5 11 4 6 10 16

Instância 7

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	56,00	0 16 8 3 10 18
Veículo 2	2	0,00	0 18
Veículo 3	2	0,00	0 18
Veículo 4	3	140,80	0 17 4 14 5 13 6 15 7 12 2 9 11 18

Instância 8

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	129,46	0 19 9 2 10 12 4 6 13 8 14 21
Veículo 2	2	0,00	0 20
Veículo 3	2	0,00	0 20
Veículo 4	3	75,24	0 17 11 5 15 3 16 7 18 20

Legenda

- Garagem
- Pátio
- Aterro
- Cliente

Percebemos o impacto da restrição ao tipo de veículo transportar as caçambas de determinados clientes. Para atender a essa restrição o modelo busca a utilização de mais de um veículo para atender clientes com requisitos diferentes. Nesse grupo visto que as distâncias percorridas por cada veículo são menores a utilização de veículo do modelo 2 não foi considerada viável.

5.2.3 Resultados instâncias Grupo 3

Já no grupo 3 foram testadas instâncias similares as do Grupo 1 e Grupo2 com a adição de mais garagens para os veículos. Embora ainda com o *gap* alto foram encontrados soluções para a Instância 10, sem restrição de atendimento, e para a Instância 12 , com restrição de atendimento.

Tabela 8- Descritivo resultados Grupo 3

Instância 10

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	0,00	0 20
Veículo 2	2	0,00	0 20
Veículo 3	2	0,00	3 23
Veículo 4	3	143,00	3 17 4 15 11 12 10 19 6 8 14 7 9 18 5 16 20

Instância 11

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	119,94	1 21 5 9 16 11 12 14 25
Veículo 2	2	0,00	0 22
Veículo 3	2	0,00	0 22
Veículo 4	3	120,99	2 18 4 7 17 10 6 15 13 20 8 19 24

Instância 12

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	88,25	2 16 10 8 18 7 17 9 15 22
Veículo 2	2	87,23	2 19 6 13 5 14 4 11 12 20
Veículo 3	2	0,00	0 20
Veículo 4	3	0,00	0 20

Legenda

 Garagem	 Pátio	 Aterro	 Cliente
---	---	--	---

Fonte : Autor

Avaliando os resultados apresentados na Tabela 8, é observado que ao fornecer mais veículos para as instâncias o comportamento permanece o mesmo das do grupo 1 e 2. A instância 10 na qual todos os veículos são capazes de coletar caçambas de todos os pesos em todos os clientes a solução é fornecida pela utilização de um veículo. Já nas Instâncias 11 e 12 na qual existe em algum cliente existem caçambas mais pesadas são necessários 2 veículos.

5.2.4 Resultados instâncias Grupo 4

No Grupo 4 foi onde o modelo mostrou os melhores resultados computacionais é onde pode-se verificar melhor o funcionamento do modelo. Foram realizados testes com instâncias equivalentes as do Grupo 1 (iniciais), do Grupo 2(com incompatibilidade cliente veículo) e do Grupo 3 (com múltiplas garagens). Foram adicionadas período de atendimento nas instâncias, as quais restringiram significativamente o espaço solução e por isso foram encontradas soluções ótimas.

Tabela 9- Descritivo resultados Grupo 4

Instância 14

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	57,99	0 16 4 14 18
Veículo 2	2	0,00	0 18
Veículo 3	2	0,00	0 18
Veículo 4	3	194,17	0 15 2 7 17 3 6 13 8 10 5 12 9 11 18

Instância 15

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	103,36	3 17 4 14 11 12 10 16 21
Veículo 2	2	0,00	1 21
Veículo 3	2	0,00	0 20
Veículo 4	3	92,06	3 19 6 8 15 7 9 18 5 13 20

Instância 16

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	137,21	0 15 2 17 5 13 6 9 11 18
Veículo 2	2	144,28	0 16 4 10 8 3 14 7 12 18
Veículo 3	2	0,00	0 18
Veículo 4	3	0,00	0 18

Instância 17

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	91,91	2 16 10 8 15 4 9 17 7 14 11 21
Veículo 2	2	46,90	2 19 6 12 5 13 20
Veículo 3	2	0,00	0 20
Veículo 4	3	0,00	0 20

Instância 18

	<u>Modelo</u>	<u>Distância Percorrida</u>	<u>Rota</u>
Veículo 1	1	108,16	0 19 13 7 17 8 21 25
Veículo 2	2	0,00	0 22
Veículo 3	2	126,48	0 20 11 4 18 5 12 14 9 6 10 16 23
Veículo 4	3	0,00	0 22

Legenda

 Garagem	 Pátio	 Aterro	 Cliente
--	--	---	---

Fonte : Autor

Na Tabela 9, a rota encontrada para a instância 18 é a única a qual não é dada por uma solução ótima. Nesse grupo são testadas instâncias com todas as características com a adição do período de atendimento. Frente a isso a utilização dos modelos de veículos para encontrar a solução é a mais diversa entre os Grupos de instâncias.

5.2.5 Resultados instâncias Grupo 5

Nessas instâncias foram considerados 6 veículos disponíveis, partindo de 5 possíveis garagens iniciais com 3 pátios e 3 aterros. Foram utilizadas como base para Instâncias 19 e 20 as instâncias 4 e 9 respectivamente. A finalidade foi de além de avaliar como o modelo se comporta com adição de novo locais foi de avaliar se as instâncias que não obtiveram solução em um primeiro momento poderia ser solucionadas com a adição de novos recursos.

Tabela 10- Descritivo resultados Grupo 5

Instância 19

	Modelo	Distância Percorrida	Rota
Veículo 1	1	0,00	0 29
Veículo 2	1	35,91	2 24 6 9 17 31
Veículo 3	2	0,00	0 29
Veículo 4	2	0,00	0 29
Veículo 5	3	138,05	1 23 15 13 27 8 25 7 19 10 14 26 11 21 12 20 5 16 18 31
Veículo 6	3	0,00	0 29

Instância 20

	Modelo	Distância Percorrida	Rota
Veículo 1	1	0,00	0 29
Veículo 2	1	75,36	4 28 14 5 17 7 20 15 9 19 30
Veículo 3	2	122,54	2 26 12 18 13 22 10 6 23 11 21 16 27 8 25 31
Veículo 4	2	0,00	0 29
Veículo 5	3	0,00	0 29
Veículo 6	3	0,00	0 29

Legenda

 Garagem	 Pátio	 Aterro	 Cliente
---	---	--	---

Fonte : Autor

Com a adição de novos recursos foi possível encontrar soluções para instâncias antes sem solução. É percebido que a possibilidade de passagem em novos pátios e aterros surtiu efeito positivo, e que a adição de mais veículos não foi responsável por mudanças.

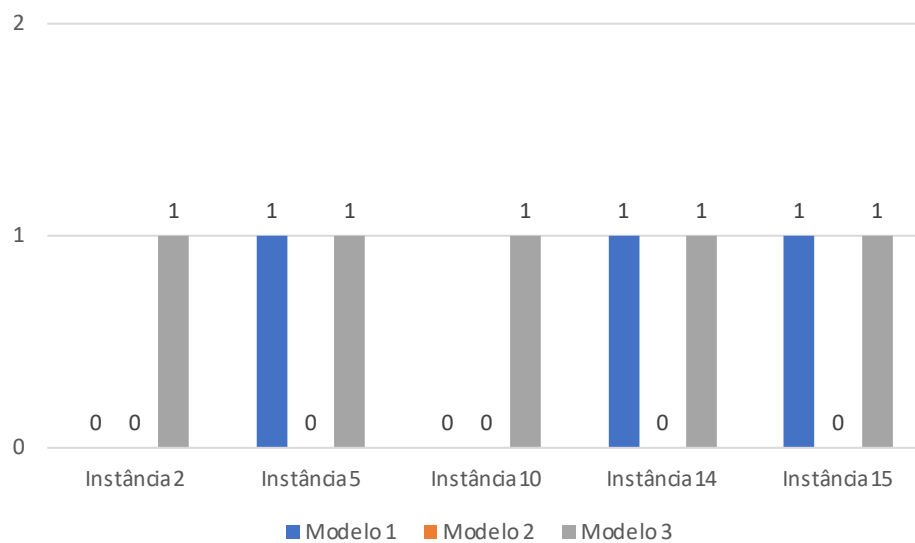
5.2.6 Comparação de Resultados das Instâncias Equivalentes

Existem instâncias que são utilizadas para a comparação do modelo com variações de parâmetros do modelo. Por não haver solução para as Instâncias 4 e 9, que são respectivamente relacionadas com as Instâncias 20 e 21 não será possível realizar comparação de resultados para estas instâncias. As demais são apresentadas nos capítulos seguintes.

5.2.6.1 Instâncias 2, 5, 10, 14 e 16

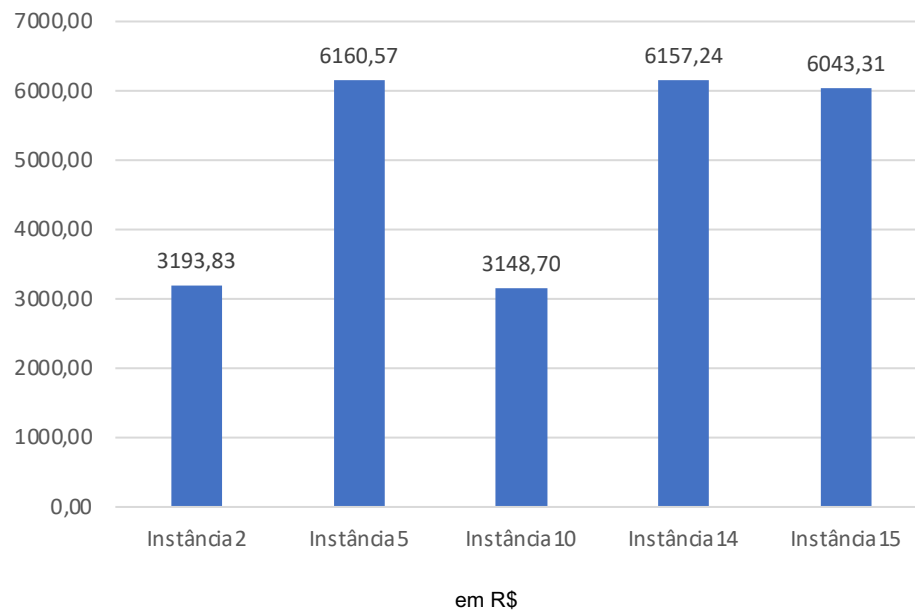
A quantidade de veículos utilizados para atender toda a demanda de todos os clientes variou entre 2 e 1, e está foi a principal causa de alteração nos custos totais. O incremento na distância percorrida foi pequeno mesmo com a utilização de 2 veículos. Desse conjunto apenas as instâncias 14 e 15 obtiveram resultados com *gap* zero. A característica que difere das outras instâncias é o período de atendimento por cliente de 2h. A outra instância que teve custos maiores foi a instância 5 a qual existe restrição de atendimento a clientes por determinados modelos de veículos.

Gráfico 1- Veículos Utilizados por Instância 2, 5, 10 ,14 e 15



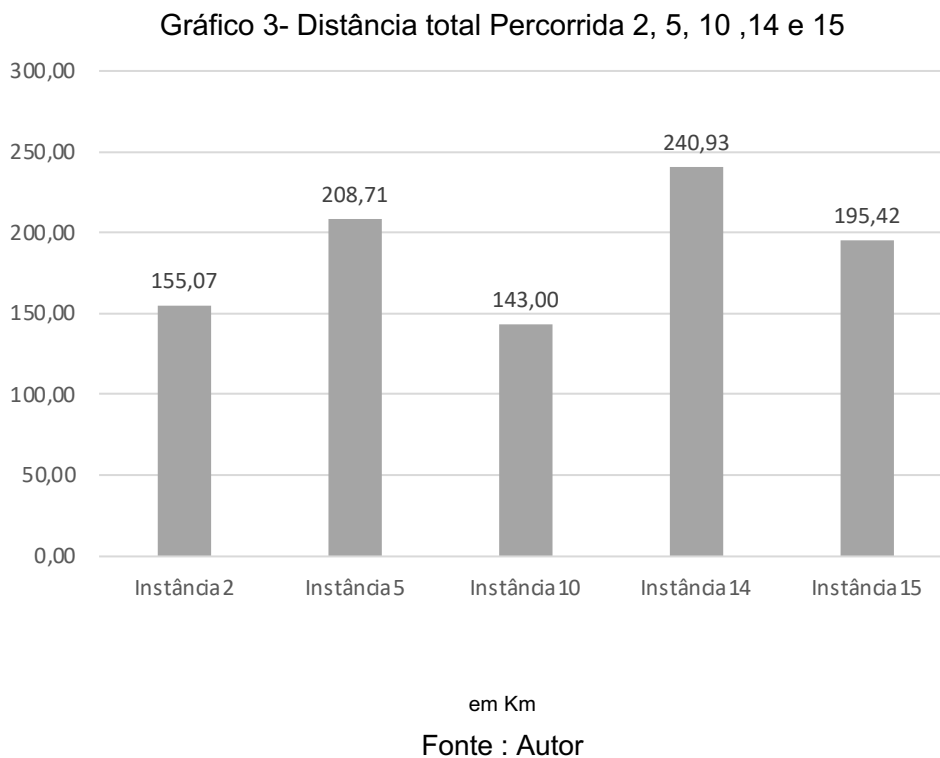
Fonte : Autor

Gráfico 2- Custo Total por Instância 2, 5, 10 ,14 e 15



em R\$

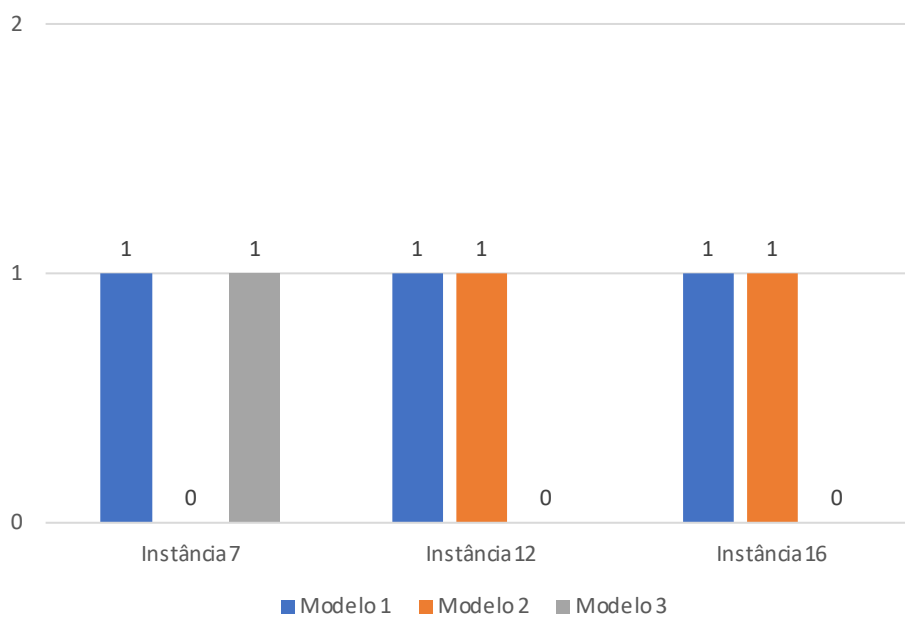
Fonte : Autor



5.2.6.2 *Instâncias 7,12,16*

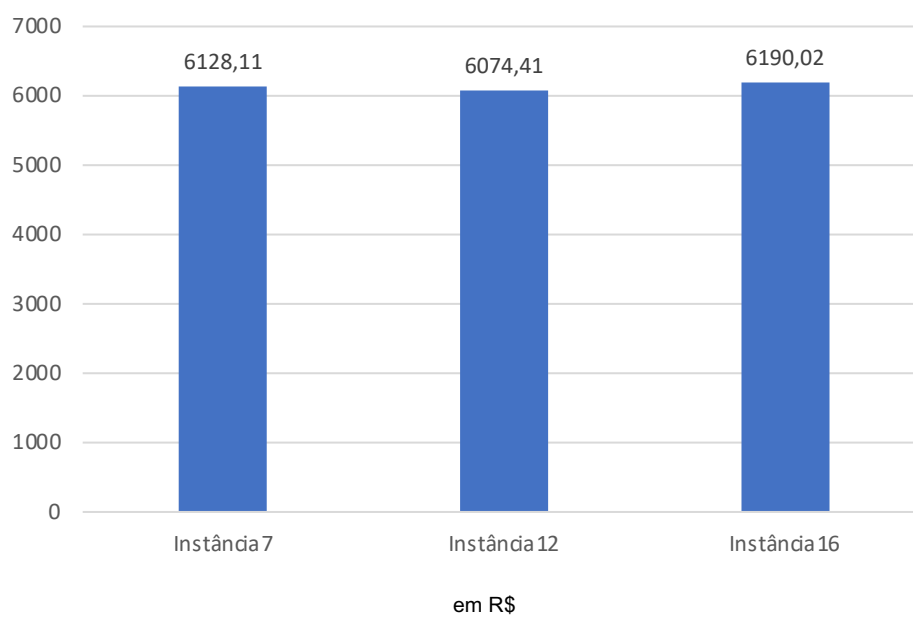
Nesse conjunto de instâncias similares a única instância que obteve a solução ótima no tempo estipulado para execução foi a Instância 16. Como apresentado na Tabela 3 essa instância além de possuir restrição de atendimento por tipos de veículos ainda conta com o período de atendimento dos clientes reduzido de 2h para cada cliente a ser atendido. O modelo indica funcionar corretamente e se adequar as restrições sempre respeitando os objetivos de utilizar a menor quantidade de veículos possível e percorrer a menor distância para atender toda demanda de todos os clientes.

Gráfico 4- Veículos Utilizados por Instância 7, 12 e 16

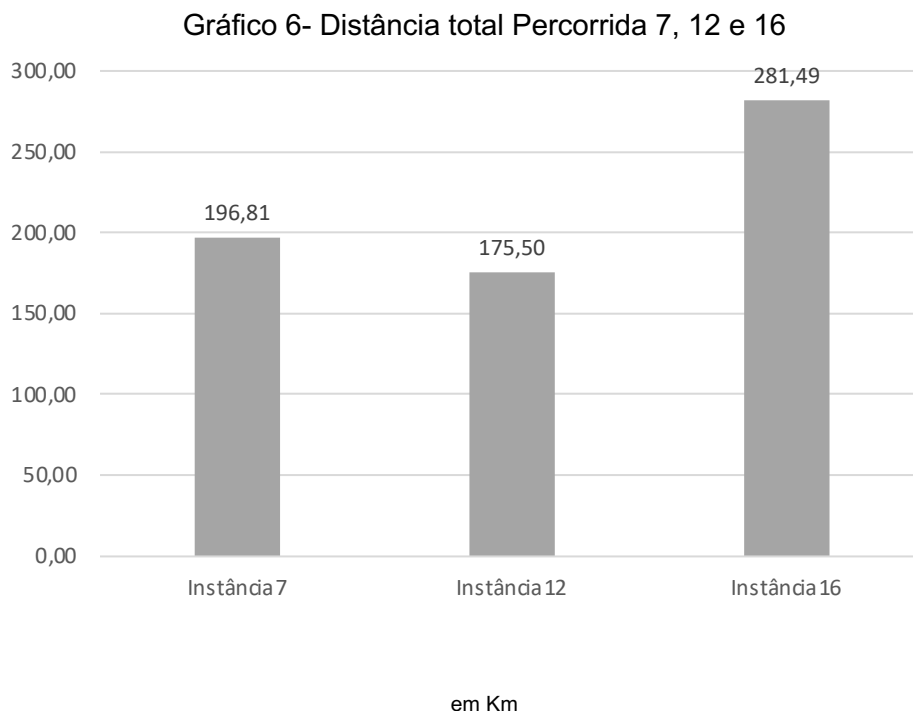


Fonte : Autor

Gráfico 5-Custo Total por Instância 7, 12 e 16



Fonte : Autor



Fonte : Autor

5.3 PRINCIPAIS PONTOS OBSERVADOS

Ao avaliar o modelo matemático proposto frente ao conjunto de instâncias foi observado que o modelo tem melhor comportamento em problemas com menores espaços de solução. A variação de combinação de garagens, pátios, aterros e veículos torna ao mesmo mais difícil a busca pela solução ótima e mais útil a utilização do modelo. Realizar o planejamento para a utilização desses veículos com base puramente empírica pode não atender a todas as condições de restrição encontradas em uma situação real. As instâncias foram executadas em uma máquina com excelentes configurações de memória e processado por 12h e ainda sim várias instâncias não obtiveram soluções ótimas. Há de se considerar em novos estudos a utilização de meta-heurísticas visando a obtenção de resultados ótimos com menores tempos computacionais.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposto um modelo matemático para auxiliar o planejamento logístico em um problema de coleta e entregas simultâneas. O modelo proposto se diferencia de demais trabalhos por unir coletas e entrega simultâneas, com recarregamento de caçambas via pátios e aterros, período de atendimento individualizado por cliente, múltiplos veículos, frota heterogênea, restrição de atendimento de cliente por modelo de veículo. Este modelo que foi denominado como *Site-Dependent Multi-Depot Vehicle Routing Simultaneous Pickup and Delivery Problem with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows*, teve por objetivo minimizar a utilização da frota de veículos disponível, bem como diminuir a distância percorrida por eles.

Nas instâncias do Grupo 1 foram avaliados como o modelo se comporta com o aumento da quantidade de clientes, e diferentes quantidades de caçambas para entregar vazias e coletar cheias. Já nas instâncias do Grupo 2 foi avaliado como o modelo era impactado pela restrição de utilização de veículos em determinados clientes, em cenários com várias quantidades de clientes e quantidades de caçambas.

As instâncias do Grupo 3 visavam avaliar qual o impacto gerado pelo aumento da quantidade de garagens para os veículos. O Grupo 4 foi realizado testes com janelas de atendimentos para cliente, essa instância foi a responsável por gerar respostas ótimas nos menores tempo, por serem as instâncias com o espaço solução mais restritivos.

Por fim, no Grupo 5, foram realizados testes com instâncias em cenários com mais garagens, pátios, aterros e veículos. Novamente por abrir o espaço solução não foram encontradas soluções ótimas.

As instâncias foram elaboradas com variações em seus parâmetros, número de garagens, de pátios, e aterros, quantidade de veículos disponíveis, período de atendimento restritivo e aberto, restrição de atendimento de cliente por veículo devido a capacidade do chassi do veículo.

Este modelo se adequa ao problema estudado, já que consegue trabalhar com o conjunto de restrições que são esperados em uma operação real. Este modelo embora definido para o problema de transporte de RCC pode ser aplicado para outros problemas de coleta e entrega nas quais sejam necessárias as mesmas considerações.

Para trabalhos futuros são sugeridos, a abordagem do problema através de meta-heurísticas, construção de um modelo dinâmico que permita modificações em uma rota durante a execução, além de ajustes no modelo que permitam que múltiplos veículos atendam um mesmo cliente e por fim mudanças que permitam que nem todos os clientes e/ou toda demanda seja necessariamente atendida.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. [S.l.], p. 52. 2020.

ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE. [S.l.], p. 54. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14728. **Caçamba estacionária de aplicação múltipla operada por poliguindaste Requisitos de construção**, Rio de Janeiro - RJ, mar 2005. 5.

AZADEH, A.; FARROKHI-ASL, H. The close–open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles. **The International Journal of Transportation Research** , v. 11, p. 78-92, 2017. ISSN ISSN: 1942-7875 (Online).

BRASIL. Lei Nº 12.305, DE 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.**, Brasília-DF, ago 2010.

BRUGLIERI, M.; MANCINI, S.; PISACANE, O. The green vehicle routing problem with capacitated alternative fuel stations. **Computers & Operations Research**, v. 112, p. 104759, 2019. ISSN ISSN 0305-0548.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução CONAMA Nº 1 DE 23/01/1986. **Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental.**, Brasília, 23 jan. 1986.

DELLAERT, N. et al. A multi-commodity two-Echelon capacitated vehicle routing problem with time windows: Model formulations and solution approach. **Computers & Operations Research**, v. 127, p. 105154, 2021. ISSN ISSN 0305-0548.

FATEME ATTAR, S. et al. Formulation and exact algorithms for electric vehicle production routing problem. **Expert Systems with Applications**, v. 204, n. 117292, out. 2022. ISSN ISSN 0957-4174.

GHANNADPOUR, S. F.; & ZARRABI, A. Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing. **Swarm and Evolutionary Computation**, v. 44, p. 728-747, 2019. ISSN ISSN 2210-6502.

GOVERNO DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO. REGIÃO METROPOLITANA DA GRANDE VITÓRIA. **RMGV SISTEMA GESTOR E INFORMAÇÕES BÁSICAS**, Vitória, 2005.

IBAM. **Plano Diretor de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana da Grande Vitória - Produto 8: Plano Diretor de Resíduos Sólidos**. IBAM - Instituto Brasileiro de Administração Municipal. Vitória - ES. 2009. (CD00429/2012).

IBGE. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2020**. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Rio de Janeiro, p. 4. 2022. (ISSN 0104-3412).

KE, G.; Y. TULETT, D. M. A time-dependent location-routing problem of hazardous material transportation with edge unavailability and time window. **Journal of Cleaner Production**, v. 322, n. 128951, Nov 2021. ISSN ISSN 0959-6526.

KHEIRI, A. et al. Tackling a VRP challenge to redistribute scarce equipment within time windows using metaheuristic algorithms. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 8, n. 5, p. 561-595, 2019. ISSN ISSN 2192-4376.

LACOMME, P.; RAULT, G.; SEVAUX, M. Integrated decision support system for rich vehicle routing problems. **Expert Systems with Applications**, v. 178, n. 114998, 2021. ISSN ISSN 0957-4174.

MA, Z.-J.; WU, Y.; DAI, Y. A combined order selection and time-dependent vehicle routing problem with time windows for perishable product delivery. **Computers & Industrial Engineering**, v. 114, p. 101-113, 2017. ISSN ISSN: 0360-8352.

MOLINA, J. C. et al. The heterogeneous vehicle routing problem with time windows and a limited number of resources. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 94, n. 103745, 2020. ISSN ISSN 0952-1976.

NACCACHE, S.; CÔTÉ, J.-F. L. C. The multi-pickup and delivery problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 269, p. 353-362, 2018. ISSN ISSN 0377-2217.

PAN, B.; ZHANG, Z.; LIM, A. A hybrid algorithm for time-dependent vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**, v. 128, p. 105193, 2021. ISSN ISSN 0305-0548.

PASHA, J. 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, n. 101623, abr. 2022. ISSN ISSN 1474-0346.

RAMOS, T. R. P.; GOMES, M. I.; BARBOSA-POVOA, A. P. A new matheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. **OR Spectrum**, v. 42, p. 75-110, 2020.

SHAHABI-SHAHMIRI, R. et al. A routing and scheduling problem for cross-docking networks with perishable products, heterogeneous vehicles and split delivery. **Computers & Industrial Engineering**, v. 157, n. 107299, 2021. ISSN ISSN 0360-8352.

SINDUSCON-ES, 2022. Disponível em: <<http://www.sinduscon-es.com.br/v2/cgi-bin/noticia.asp?idnoticia=4780>>. Acesso em: 15 jul. 2022.

STAVROPOULOU, F. The Consistent Vehicle Routing Problem with heterogeneous fleet. **Computers & Operations Research**, v. 140, n. 05644, 2022. ISSN ISSN 0305-0548.

VOIGT, S. et al. Hybrid adaptive large neighborhood search for vehicle routing problems with depot location decisions. **Computers & Operations Research**, v. 146, n. 105856, 2022. ISSN ISSN 0305-0548.

YU, V. F.; NORMASARI, N. M. E.; CHEN, W.-H. Location-routing problem with time-dependent demands. **Computers & Industrial Engineering**, v. 151, n. 106936, jan 2021. ISSN ISSN 0360-8352.

ZARE-REISABADI, E.; HAMID MIRMOHAMMADI, S. Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. **Computers & Industrial Engineering**, v. 90, p. 177-185, 2015. ISSN ISSN 0360-8352.

ZHANG, W. et al. Hybrid multiobjective evolutionary algorithm with fast sampling strategy-based global search and route sequence difference-based local search for VRPTW. **Expert Systems with Applications**, v. 145, n. 113151, 2020. ISSN ISSN 0957-4174.

ZHANG, Y. et al. A generalized multi-depot vehicle routing problem with replenishment based on LocalSolver. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 6, p. 88-98, 2015. ISSN ISSN 1923-2934 (Online).