

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

HENRIQUE FIOROT ASTOURES

**PLANEJAMENTO DE ENTREGAS EM ÁREAS URBANAS CONSIDERANDO
RECARREGAMENTO INTERMEDIÁRIO, VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS
COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS DEPÓSITOS E RESTRIÇÃO DE ACESSO**

VITÓRIA
2021

HENRIQUE FIOROT ASTOURES

**PLANEJAMENTO DE ENTREGAS EM ÁREAS URBANAS CONSIDERANDO
RECARREGAMENTO INTERMEDIÁRIO, VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS
COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS DEPÓSITOS E RESTRIÇÃO DE ACESSO**

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.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa.

VITÓRIA

2021

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de
Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

A856p Astoures, Henrique Fiorot, 1992-
Planejamento de entregas em áreas urbanas considerando
recarregamento intermediário, veículos com múltiplos
compartimentos, múltiplos depósitos e restrição de acesso /
Henrique Fiorot Astoures. - 2021.
119 f. : il.

Orientador: Rodrigo de Alvarenga Rosa.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Otimização matemática. 2. Logística. 3. Computação -
Matemática. 4. Pesquisa operacional. I. de Alvarenga Rosa,
Rodrigo. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro
Tecnológico. III. Título.

CDU: 624

**PLANEJAMENTO DE ENTREGAS EM ÁREAS URBANAS CONSIDERANDO
RECARREGAMENTO INTERMEDIÁRIO, VEÍCULOS COM MÚLTIPLOS
COMPARTIMENTOS, MÚLTIPLOS DEPÓSITOS E RESTRIÇÃO DE ACESSO**

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 2021 por:

Prof. Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Macksuel Soares de Azevedo
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Interno

Prof. Dr. Renato Elias Nunes de Moraes
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

Prof. Dr. Wander Demonel de Lima
Universidade Federal do Espírito Santo
Examinador Externo

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conduzir em todos os momentos difíceis, iluminando cada etapa, mostrando o caminho correto a seguir para que eu vencesse todas as barreiras da minha vida.

Aos meus pais, meus alicerces, por incentivar e não me deixar fraquejar nas adversidades, ensinando que tudo pode ser tirado de mim, mas não o conhecimento. Agradeço o amor, carinho e apoio em minhas decisões e, principalmente, por compreenderem minhas ausências e responsabilidades para um dia conquistar o título de mestre.

À minha noiva e meu porto seguro, Thais, que sempre me apoiou na decisão de iniciar o mestrado. Sou grato por me ajudar, me amparar nos momentos mais difíceis, me incentivando a continuar e a enfrentar as provas de conciliar o trabalho com o mestrado.

Aos amigos, por todo o incentivo e por torcerem pelo meu sucesso. Em especial ao Iago, Lirielly e Rafael, pelos conselhos e ajuda acadêmica que me ajudaram a concluir com sucesso mais uma etapa da minha vida.

Ao meu orientador Rodrigo de Alvarenga Rosa, por transmitir todo o seu conhecimento, pela dedicação e paciência admiráveis e por todo apoio para me tornar um mestre.

Aos integrantes do LAMMEP, por partilharem conhecimento e por não hesitarem em ajudar nas adversidades. O suporte empenhando por cada integrante me fez crer que teria sucesso nesta minha empreitada, contribuindo assim, para o reconhecimento do nosso grupo de pesquisa.

A todos que de alguma forma contribuíram com este resultado, muito obrigado!

RESUMO

Em um período recente, registrou-se um crescimento da demanda por transporte de mercadoria por comércios e residências nos grandes centros urbanos, principalmente em períodos como o de pandemia do Corona vírus, impondo o aumento da demanda por veículos para realizar esses transportes. Com os impactos socioambientais inerentes a esse crescimento, as autoridades das cidades julgaram necessário restringir a entrega por meio de veículos de grande porte, fazendo-se necessário a elaboração de um planejamento de logística urbana nesses grandes centros. Assim, essa dissertação propõe uma nova classe de problema denominado *Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows* para solucionar o problema de entregas em áreas urbanas com tráfego intenso e legislação restritiva à entrada de veículos de grande porte, considerando o planejamento de logística urbana para entrega ao cliente final. O objetivo é minimizar o custo total de entregas em áreas urbanas considerando múltiplos armazéns centrais, alocação unitária das caixas em múltiplos compartimentos, restrição de acesso, janela de tempo de atendimento no cliente e armazéns intermediários para reabastecimento. O modelo matemático foi testado no software CPLEX 12.8 em instâncias geradas a partir de dados preliminares de uma empresa que está estudando a viabilidade econômica e operacional no município de Vitória, Espírito Santo. Foi apresentado um modelo matemático que atende ao problema estudado, incorporando características operacionais reais, e os resultados dos testes realizados mostraram que, para as instâncias testadas, ter mais armazéns intermediários disponíveis é a estratégia mais econômica.

Palavras-chave: Roteamento de Veículos, Recarregamento Intermediário, Múltiplos Compartimentos, Múltiplos Depósitos, Restrição de Acesso, Logística Urbana.

ABSTRACT

In a recent period, there has been an increase in the demand for the transportation of goods by businesses and homes in large urban centers, especially in periods like Corona virus pandemic, imposing the increased demand for vehicles to carry out these transports. With the socioenvironmental impacts inherent to this growth, city authorities deemed it necessary to restrict delivery by large vehicles, making it necessary to prepare an urban logistics plan in these large centers. Thus, this dissertation proposes a new class of problem called Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows to solve the problem of deliveries in urban areas with heavy traffic and legislation restricting the entry of large vehicles, considering the planning of urban logistics for the last mile delivery. The goal is minimizing the total cost of deliveries in urban areas considering multiple warehouses, unit allocation of boxes in multiple compartments, site dependent, customer service and intermediate facilities time window, and intermediate facilities for refueling. The mathematical model was tested in the CPLEX 12.8 software in instances generated from preliminary data from a company that is studying the economic and operational feasibility in the city of Vitória, Espírito Santo. A mathematical model that meets the studied problem was presented, incorporating real operational characteristics, and the results of the tests performed showed that, for the tested instances, having more intermediate warehouses available is the most economical strategy.

Keywords: Vehicle Routing, Intermediate Replenishment, Multiple Compartment, Multi-Depot, Site Dependent, City Logistic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planejamento de entregas em centros urbanos utilizando armazéns intermediários e armazéns centrais.	18
Figura 2 - Estrutura da Dissertação	23
Figura 3 – Exemplos de situações aplicáveis ao VRPIRF	25
Figura 4 - Tipo de veículo com múltiplos compartimentos	31
Figura 5 - Mudança de rotas dos veículos ao aumentar a quantidade de depósitos	39
Figura 6 - Etapas da metodologia desenvolvida.....	55
Figura 7 - Tipos de veículos utilizados na operação.	55
Figura 8 - Bairros selecionados para o estudo de caso	58
Figura 9 – Esquema das rotas realizadas pelos veículos	66
Figura 10 - Ilustração dos conjuntos de clientes e armazéns intermediários	68
Figura 11 - Conjuntos (a) MD e Cc ; (b) MD e F do modelo matemático proposto.....	68
Figura 12 - Esquema das rotas dos veículos na Instância 5.....	85
Figura 13 - Esquema das rotas dos veículos na Instância 7.....	94
Figura 14 - Esquema da Rota R1 da Bicicleta Elétrica na Instância 12	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos Artigos Publicados sobre o VRPIRF, o MCVRP, o MDVRP e o SDVRP.....	47
Tabela 2 - Características das Instâncias.....	59
Tabela 3 – Resultados Encontrados pelo CPLEX.....	78
Tabela 4 - Análises dos Resultados Operacionais.....	80
Tabela 5 - Rotas da Instância 5	82
Tabela 6 - Rotas da Instância 6	83
Tabela 7 - Rotas da Instância 7	88
Tabela 8 - Rotas da Instância 8	89
Tabela 9 - Rotas da Instância 9	90
Tabela 10 - Rotas da Instância 10	91
Tabela 11 - Rotas da Instância 11	92
Tabela 12 - Rotas da Instância 12	97
Tabela 13 - Rotas da Instância 13	98
Tabela 14 - Rotas da Instância 14	102
Tabela 15 - Rotas da Instância 15	103
Tabela 16 - Rotas da Instância 16	106
Tabela 17 – Análise de Incompatibilidade entre Caixas.....	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4 a 6	86
Gráfico 2 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4 a 6	86
Gráfico 3 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4 a 6	87
Gráfico 4 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 7 a 11	95
Gráfico 5 – Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 7 a 11.....	95
Gráfico 6 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 7 a 11	96
Gráfico 7 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 12 e 13	100
Gráfico 8 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 12 e 13 ..	100
Gráfico 9 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 12 e 13	101
Gráfico 10 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 14 e 15	104
Gráfico 11 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 14 e 15	104
Gráfico 12 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 14 e 15	105
Gráfico 13 -Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4 e 16	107
Gráfico 14 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4 e 16	107
Gráfico 15 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4 e 16	108

LISTA DE SIGLAS

ACO	Ant Colony Optimization
ACS	Ant Colony System
ALNS	Adaptive Large Neighborhood Search
AMP	Adaptive Memory Principle
AVNS	Adaptive Variable Neighborhood Search
B&C	Branch and Cut
B&P	Branch-and-Price
BCP	Branch-Cut-Price
BFD	Best Fit Decreasing
BP	Branch and Price
CARPIF	Capacitated Arc Routing Problem with Intermediate Facilities
CG	Column Generation
CN	Coleta de Neve
COMVRP	Close-Open Mixed Vehicle Routing Problem
CP	Comida Perecível
CRL	Coleta de Resíduos de Lixo
CRV	Coleta de Resíduos de Vidro
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
E-FSMFTW	Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations
E-VRP-NL	Electric Vehicle Routing Problem with Nonlinear Charging Function
E-VRP-SCS	Electric Vehicle Routing Problem with Shared Charging Stations
E-VRPTW	Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations
E-VRPTWPR	Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows, Partial Recharges and Satellite Customers
FRP	Fuel Replenishment Problem
GA	Genetic Algorithm
GAM	Generalized Assignment Method

GAP	Generalized Assignment Problem
GLS	Guided Local Search
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedures
GRI	Greedy Remove/Insert
GVNS	General Variable Neighborhood Search
GVRP	Green Vehicle Routing Problem
HABC	Hybrid Artificial Bee Colony
HALNS	Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search
HC	Heuristic Concentration
HFSDVRPM TW	Heterogeneous Fleet Site Dependent Vehicle Routing Problem with Multiple Time Windows
HGA	Hybrid Genetic Algorithm
HPSO	Hybrid Particle Swarm Optimization
HSAGVN	Hybrid Self-Adaptive General Variable Neighborhood
IACO	Improved Ant Colony Optimization
ILP	Integer Linear Programming
ILS	Iterated Local Search
IP	Integer Programming
ITS	Iterated Tabu Search
IWD	Intelligent Water Drop
LNS	Large Neighborhood Search
LRPIF	Location Routing Problem with Intraroute Facilities
LRPIF-MR	Location Routing Problem with Intra-route Facilities and Multiple Resources
LSP	Local Search Procedures
MA	Memetic Algorithm
MCCARPIF	Multi-Compartment Capacitated Arc Routing Problem with Intermediate Facilities
MCVRP	Multiple Compartment Vehicle Routing Problem
MCVRP- CFCS	MultiCompartment Vehicle Routing Problem with Continuously Flexible Compartment Sizes

MCVRPTW	Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows
MDGRVP	Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem
MDMCVRP	Multi-Depot Multi-Compartment Vehicle Routing Problem
MDVRP	Multi-Depot Vehicle Routing Problem
MDVRPI	Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Inter-Depot routes
MHDT	Merge-Head and Drop-Tail
MILP	Mixed-Integer Linear Programming
MIP	Mixed Integer Programming
MM	Modelo Matemático
M-MDVRP	Modified Multi-Depot Vehicle Routing Problem
MPDVRPTW	Multi-Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows
NL	Neighbor Lists
NN	Nearest Neighbor
O-PC	One-Pass Construction
OPVRP	Open Vehicle Routing Problem
OQ	Óleo Quente
PD	Produtos Diversos
PDP	Produtos Derivados do Petróleo
PL	Produtos Lácteos
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PMX	Partially Matched Crossover
PSRP	Petrol Station Replenishment Problem
PSRP-AD	Petrol-station Replenishment Problem with Adjustable Demands
PSV	Platform Supply Vessel
PVRP	Periodic Vehicle Routing Problem
PVRP-IF	Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities
RPP	Rural Postman Problem
RS	Resíduos Sólidos

SA	Simulated Annealing
SAA	Sistema Automatizado de Alocação
SCO	Sector Combination Optimization
SDVRP	Site Dependent Vehicle Routing Problem
SDVRPSTW	Site-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Window
SR	Savings-based Routing
TS	Tabu Search
VND	Variable Neighborhood Descent
VNS	Variable Neighborhood Search
VRPIRF	Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities
VRPIS	Vehicle Routing Problem with Intermediate Stops

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS.....	20
1.1.1	OBJETIVO GERAL	20
1.1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.2	JUSTIFICATIVA.....	21
1.3	ESTRUTURA DA PROPOSTA DE DISSERTAÇÃO	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	24
2.1	VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH INTERMEDIATE REPLENISHMENT FACILITIES (VRPIRF)	24
2.1.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO <i>VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH INTERMEDIATE REPLENISHMENT FACILITIES (VRPIRF)</i>	25
2.2	MULTIPLE COMPARTMENT VEHICLE ROUTING PROBLEM (MCVRP).....	31
2.2.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO <i>MULTIPLE COMPARTMENT VEHICLE ROUTING PROBLEM (MCVRP)</i>	32
2.3	MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEM (MDVRP).....	38
2.3.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO <i>MULTI-DEPOT VEHICLE ROUTING PROBLEM (MDVRP)</i>	39
2.4	SITE-DEPENDENT VEHICLE ROUTING PROBLEM (SDVRP)	43
2.4.1	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO <i>SITE-DEPENDENT VEHICLE ROUTING PROBLEM (SDVRP)</i>	43
3	MÉTODO DE PESQUISA	54
3.1	ETAPAS DESENVOLVIDAS	54
3.2	O PROBLEMA ANALISADO	54
3.3	ELABORAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	56
3.4	INSTÂNCIAS DE TESTE	57
3.5	EXECUÇÃO DO MODELO.....	62
4	MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO	63
5	RESULTADOS E ANÁLISES	77

5.1	ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CLPEX.....	78
5.2	ANÁLISE OPERACIONAL DOS RESULTADOS	79
6	CONCLUSÕES.....	111
	REFERÊNCIAS.....	113

1 INTRODUÇÃO

Os centros urbanos, compostos por um grande número de lojas e residências, têm aumentado de tamanho rapidamente. Atualmente 54% da população mundial vive em cidades, sendo esperado até 2050 que este número aumente para 66%, aproximadamente (UNITED NATIONS, 2014). Com este crescimento considerável, há um aumento na distribuição de mercadorias e bens de consumo e, conseqüentemente, um aumento na necessidade de se utilizar mais veículos para atender às necessidades de suprimentos da sociedade, resultando em efeitos negativos a ela. Dentre esses efeitos pode-se mencionar os engarrafamentos, emissões de gases de efeito estufa, entre outros (CRAINIC, RICCIARDI e STORCHI, 2004).

Considerando os impactos citados, os governantes de algumas capitais do Brasil estão implementando várias iniciativas de sustentabilidade, como, por exemplo, utilização de veículos elétricos, sistemas inteligentes de gerenciamento de frota, centros de consolidação urbana e leis que limitam ou proíbem a entrada de caminhões de grande porte em vias municipais (AWASTHI, ADETILOYE e CRAINIC, 2016). As capitais Belo Horizonte, Porto Alegre, Rio de Janeiro, Salvador, São Paulo e Vitória são exemplo disso (AGÊNCIA TRANSPORTA BRASIL, 2014). Se vierem a ser utilizados, estes veículos de grande porte devem descarregar em armazéns centrais localizados nos limites de acesso das cidades, para então carregar veículos menores que irão entrar nelas e efetivamente entregar ao cliente final (SANTANA *et al.*, 2017).

O setor de transporte representa um custo de 6,8% do PIB brasileiro (CNT, 2016), o que demonstra a sua grande importância sobre os aspectos socioeconômicos. Ao analisar as tendências do volume de transporte de mercadorias e passageiros, observa-se a sinergia com a evolução do produto interno bruto mundial nos últimos 20 anos (EUROPEAN COMMISSION, 2016). O que tange o fluxo de mercadorias e bens de consumo, o aumento significativo do comércio eletrônico (e-commerce) ressaltou os problemas referentes à entrega doméstica (OLIVEIRA *et al.*, 2017).

O e-commerce no Brasil apresenta um cenário positivo de crescimento, já que foram

totalizados 148 milhões de pedidos realizados pela internet em 2019, o que representa um aumento de 21%, se comparado a 2018 (E-BIT, 2020). Além disso, há também um registro no aumento de consumidores comprando online, passando de 59 milhões em 2018 para 62 milhões em 2019, um crescimento de 6%. Os bens não duráveis, duráveis e os perecíveis foram os que tiveram maior variação positiva no número de pedidos, 61%, quando comparado 2019 e 2018 (E-BIT, 2020). Em relação a 2020, somente em maio o comércio eletrônico registrou um crescimento de 127%, o que representa 24 milhões de pedidos, aproximadamente, por lojas virtuais. As categorias com maior destaque nesse período são de alimentos e bebidas, papelaria e brinquedos (E-COMMERCE BRASIL, 2020a).

A pandemia do Corona vírus em 2020 acelerou a digitalização dos consumidores, e das empresas que viram o e-commerce como uma saída para sobreviver às dificuldades financeiras impostas. Desde o início da pandemia no Brasil em março de 2020, mais de 135 mil lojas virtuais foram criadas por mês. A média mensal antes da pandemia era de 10 mil lojas por mês. Neste mesmo período foi registrado o crescimento também de reclamações relacionados à demora na entrega, por ter uma infraestrutura e pouca tecnologia agregada para suportar este aumento significativo em pedidos e entregas (E-COMMERCE BRASIL, 2020b).

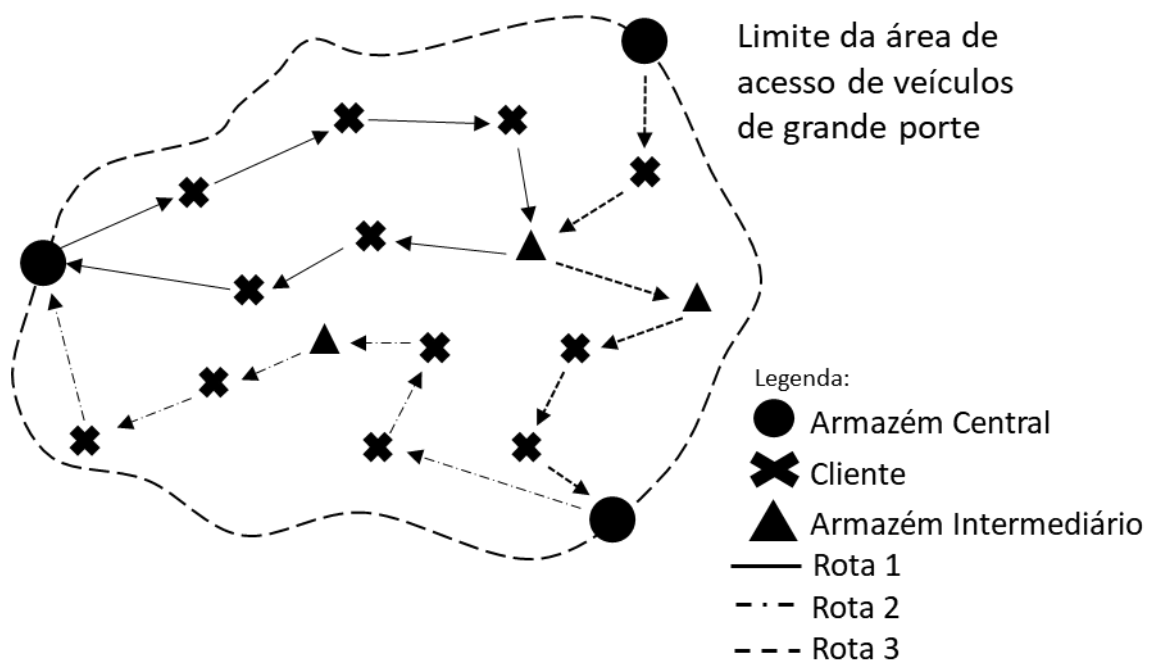
Com a necessidade de se isolar para conter a disseminação do vírus, a população adotou o uso em massa de aplicativos (apps) de delivery. As compras realizadas nos principais canais de vendas em domicílio cresceram 59% em abril de 2020 em comparação com o período anterior ao isolamento social. Os setores de alimentação e saúde foram os que mais cresceram, representando 15% do aumento registrado no mês (E-COMMERCE BRASIL, 2020c). Em uma pesquisa recente foram constatados que 49% dos consumidores devem seguir com compras no supermercado online ou através de delivery, e na hora de escolher seus fornecedores 53% afirmam que vão continuar optando por pequenos produtores locais, que recorrem a apps de entrega para realizar suas vendas (SOCIAL MINER, 2020).

Percebe-se então a importância que o frete representa na formação do valor de um produto no comércio eletrônico, sendo fator determinante para agregação de valor ao cliente final. Esta questão torna-se ainda mais significativa em áreas urbanas pois

a maioria das compras feitas pela internet são destinadas à essas zonas (CÁRDENAS, BECKERS e VANELSLANDER, 2017).

Portanto, este trabalho propõe um planejamento de distribuição de mercadorias dentro de centros urbanos com restrição de entrada de veículos de grande porte. Este planejamento considera o uso de armazéns intermediários, múltiplos armazéns centrais e veículos de pequeno porte. No entanto, veículos de pequeno porte, por sua limitação de carga, só conseguem fazer pequenas rotas, tendo que voltar para o armazém central, perdendo muito tempo e gastando mais combustível. O planejamento compreende então a utilização de pequenos armazéns intermediários dentro das cidades, onde os veículos podem ser recarregados e continuar a sua rota sem ter que retornar a algum armazém central para recarregar e iniciar uma nova rota. Os veículos iniciam as suas rotas de um armazém central disposto no limite da cidade, no qual é definido anteriormente no planejamento realizado pelo algoritmo, retornando ao mesmo ou não ao final da rota, com o objetivo final de reduzir o custo operacional (Figura 1). Quanto maior a área limitada pelas leis de acesso, maiores são as vantagens da abordagem desse trabalho, por maximizar os efeitos das características consideradas.

Figura 1 – Planejamento de entregas em centros urbanos utilizando armazéns intermediários e armazéns centrais.



Na Figura 1 pode ser visto que há três armazéns centrais localizados na linha limítrofe da área de restrição de acesso da cidade. Assim, eles podem receber os veículos maiores e podem carregar os veículos menores para iniciar as rotas dentro da área da cidade. Os veículos de carga menores considerados são bicicletas elétricas, bicicletas convencionais e motocicletas, ambos com pequena capacidade de volume e peso. Em consequência da baixa capacidade dos veículos eles não conseguem atender muitos clientes em uma única rota e, desta forma, no planejamento, em vez de eles terem que voltar para algum armazém central para recarregar, eles se direcionam para armazéns intermediários para serem recarregados e, assim, poderem continuar suas rotas. Esses armazéns intermediários são carregados à noite, por veículos de maior porte, quando a restrição de acesso é liberada. Os veículos que fazem rotas dentro das cidades podem possuir vários compartimentos, permitindo o transporte de diferentes cargas que eventualmente são incompatíveis como, por exemplo, um refrigerante com um hambúrguer, ou alho com chocolate, por suas características de manutenção. Alguns clientes, eventualmente, não podem receber todos os tipos de veículo por conta de sua localização geográfica, como em lugares íngremes, limitando a realização de entregas por um veículo específico. Isso acontece, por exemplo, em cidades como Vitória-ES que possuem bairros montanhosos. Bicicletas não motorizadas carregando uma carga tem extrema dificuldade de chegar ao local. Em alguns casos as impossibilita de transitar nesses endereços.

Para apoiar os tomadores de decisão da empresa de logística no planejamento das rotas considerando os múltiplos armazéns centrais, armazéns intermediários, a frota heterogênea composta por veículos com múltiplos compartimentos, restrição de acesso e as janelas de tempos estabelecidas pelos clientes para que os veículos possam entregar as mercadorias, este trabalho propõe um modelo matemático que integra os modelos *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF), o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MCVRPTW), o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) e o *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), e acrescenta a questão de controlar em que veículo e em que compartimento cada caixa é transportada, denominado nesta proposta de dissertação como alocação unitária das caixas. O novo modelo foi intitulado como *Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem*

with Intermediate Replenishment Facilities and Time Windows. Na literatura científica, após revisão bibliográfica não foram encontrados artigos que propusessem a integração dos modelos, tampouco tratassem caixa individualmente.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Propor um planejamento de logística urbana dentro de grandes centros com limitação de entrada de veículos de grande porte utilizando um modelo matemático, considerando múltiplos armazéns centrais, restrição de acesso e janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário, armazéns intermediários para reabastecimento, alocação unitária das caixas em múltiplos compartimentos e utilização de veículos de pequeno porte para entrega ao cliente final, a fim de minimizar os custos relacionados ao transporte de cargas nas grandes cidades.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos da dissertação são:

- Propor um planejamento para entregas de mercadorias e bens de consumo em grandes centros urbanos com limitação de acesso a veículos de grande porte e utilização de veículos alternativos de pequeno porte;
- Verificar a aplicação do modelo matemático em instâncias com dados de estudo de viabilidade econômica e operacional, que representam a operação de uma empresa em Vitória - ES.
- Apresentar uma análise da quantidade de armazéns intermediários e centrais disponíveis e necessários para reabastecimento nos resultados alcançados pelo modelo matemático.
- Apresentar uma análise da quantidade de compartimentos disponíveis em cada tipo de veículo nos resultados alcançados pelo modelo matemático.

- Apresentar uma análise da alteração da janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário nos resultados alcançados pelo modelo matemático.
- Apresentar uma análise da alteração da restrição de acesso ao cliente e da incompatibilidade das caixas nos resultados alcançados pelo modelo matemático.
- Apresentar uma análise da aplicação do modelo em situações de grande porte nos resultados alcançados pelo modelo matemático.

1.2 Justificativa

Nos últimos anos houve um aumento na necessidade de encontrar práticas eficientes e sustentáveis em todo o mundo (JOERSS, NEUHAUS e SCHRODER, 2016). Com o aumento considerável da concentração urbana e o comércio via internet (E-BIT, 2020) é esperado que aconteçam mudanças no fluxo de entrega e na movimentação dos veículos na cidade. Essas mudanças são influenciadas por novas tecnologias de consumo emergentes e por isso precisam de soluções que se adaptem à essa nova tendência (LOWE e RIGBY, 2014). As opções de entrega ao cliente são um ponto chave, principalmente com o desafio de apresentar soluções que atendam as janelas de tempo e acesso aos clientes, as restrições de entrada de grandes veículos nas metrópoles e a redução dos impactos socioambientais inerentes a entrega em grandes centros urbanos, como longos engarrafamentos, emissões de gases de efeito estufa, entre outros (CRAINIC, RICCIARDI e STORCHI, 2004).

Portanto, a elaboração de um planejamento de entregas urbanas com a utilização de um modelo matemático eficiente, que comporte restrições reais, com múltiplos armazéns centrais, múltiplos compartimentos, janela de tempo de atendimento, restrição de acesso, recarregamento intermediário e alocação unitária das caixas, a empresa que utilizar o modelo desenvolvido nesta dissertação será capaz de otimizar os custos de entrega como também amenizar indiretamente os impactos negativos que esse crescimento gera, atender as necessidades gerando novas oportunidades para todos os envolvidos e cumprir com a legislação definida pelas metrópoles.

No âmbito da pesquisa operacional, a relevância deste trabalho reside na apresentação de um modelo matemático que representa uma contribuição para o meio científico, já que não foram encontradas aplicações do *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF), do *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MCVRPTW), do *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) em conjunto com o *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), considerando a alocação unitária das caixas nas operações de entrega urbana.

1.3 Estrutura da proposta de dissertação

Para atender os objetivos dessa pesquisa, o conteúdo a ser desenvolvido será estruturado em seis capítulos e distribuídos da seguinte forma:

O Capítulo 1 contém a introdução ao problema, que contextualiza e define o problema a ser tratado. Fazem parte deste capítulo o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa do assunto.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre os conceitos principais relativos ao problema, como o *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF), o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP), o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), e por fim o *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP), considerando suas aplicações avançadas.

O Capítulo 3 explica o Método de Pesquisa adotado nesta dissertação. Além disso, são apresentadas as instâncias de teste e seus objetivos.

O Capítulo 4 apresentará o modelo matemático proposto que será a base para a pesquisa.

O Capítulo 5 trará os resultados dos experimentos computacionais realizados no CPLEX e as subsequentes análises.

Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e sugestões de trabalhos futuros, seguido pelas Referências Bibliográficas utilizadas. Na Figura 2 é possível observar o esquema da dissertação.

Figura 2 - Estrutura da Dissertação



Fonte: do Autor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) foi um dos primeiros modelos matemáticos proposto para roteirização de veículos. Este modelo inicial define rotas para atender a demanda por mercadorias de um conjunto de clientes geograficamente dispersos, entregues por uma frota de veículos, iniciando e terminando suas rotas em um armazém central, minimizando o custo total relacionado. Atualmente os modelos de CVRP são mais complexos, contemplando um avanço tecnológico considerável desde o modelo inicial proposto por Dantzig e Ramser (1959) e incorporando as limitações e restrições do mundo real (BRAEKERS, REMAEKERS e VAN NIEUWENHUYSE, 2016).

A seguir serão apresentadas variações do CVRP, suas conceituações e discutidas as abordagens e formulações adotadas para o *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF), o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP), o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP), e por fim o *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP) como suas variantes encontradas na literatura.

2.1 Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities (VRPIRF)

No *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF) cada veículo começa e termina sua rota em um armazém central. Os veículos têm a possibilidade de reabastecer seus compartimentos de carga em armazéns intermediários ao longo de suas rotas, a fim de ter o necessário para atender às demandas dos clientes. Essa alternativa é especialmente interessante nos casos em que o armazém central se encontra a uma distância muito grande dos clientes a serem atendidos (BRANDÃO e PUREZA, 2015).

Dentre as situações reais, é possível encontrar o VRPIRF aplicado no problema de recarregamento das baterias de carros elétricos (SCHNEIDER, STENGER e GOEKE, 2014). Para exemplificar, na Figura 3 – Exemplos de situações aplicáveis

ao VRPIRF é possível observar o abastecimento por placas solares e por meio da rede elétrica convencional.

Figura 3 – Exemplos de situações aplicáveis ao VRPIRF



Fonte: Época (2017).



Fonte: Exame (2016).

A revisão dos artigos relacionados ao VRPIRF mostra uma literatura limitada sobre o assunto, por se tratar de um tema de desenvolvimento recente. Desta forma, esta proposta de dissertação também colabora com o desenvolvimento deste assunto para a ciência. A seguir são apresentados a revisão destes trabalhos.

2.1.1 Revisão Bibliográfica do *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF)

Após revisar artigos e trabalhos sobre o assunto, é perceptível a falta de padrão na utilização da sigla que envolve problemas relacionados ao VRPIRF, iniciando por Ghiani, Improta e Laporte (2001) que, a partir do clássico *Capacitated Arc Routing Problem* (CARP) desenvolveram uma variação denominada *Capacitated Arc Routing Problem with Intermediate Facilities* (CARPIF), adicionando instalações intermediárias, que recebem os veículos que passaram por um conjunto de vértices coletando suas demandas, para descarregar. Os autores informaram que este problema pode ser aplicado a coleta urbana de lixo. Para a construção e teste do algoritmo foram utilizados o *Rural Postman Problem* (RPP), um relaxamento de uma formulação linear inteira do problema e o próprio CARP. Foram feitos testes computacionais a partir de *benchmark* que confirmaram a qualidade da solução.

Crevier, Cordeau e Laporte (2007) apresentaram o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem with Inter-Depot routes* (MDVRPI), onde propuseram uma heurística combinando o *Adaptative Memory Principle* (AMP), o *Tabu Search* (TS) e o *Integer Programming* (IP). Para testá-la geraram instâncias randômicas a partir de dados de *benchmark* derivados do *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) proposto por Cordeau, Gendreau e Laporte (1997). A heurística demonstrou-se robusta e apresentou tempos de execução razoavelmente rápidos.

Polacek *et al.* (2008) deram continuidade a esta classe de problemas, utilizando o *Capacitated Arc Routing Problem with Intermediate Facilities* (CARPIF) desenvolvido por Ghiani, Improta e Laporte (2001). Nesta oportunidade aplicaram a heurística *Variable Neighborhood Search* (VNS) para solucionar quatro conjuntos de instancias de *benchmark*. Mesmo para instâncias mais complexas o algoritmo se mostrou eficaz, solucionando-as com um tempo razoável.

O trabalho apresentado por Tarantilis, Zachariadis e Kiranoudis (2008) foi o primeiro a introduzir o *Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities* (VRPIRF). Eles propuseram uma metodologia dividida em três passos, no qual utilizaram metaheurísticas para alcançar o nível de interação desejável para o estudo realizado. No primeiro passo a solução inicial foi gerada por uma heurística construtiva estocástica. Já no segundo passo os autores utilizaram o TS e o VNS para melhorar a solução inicial encontrada. Por fim, empregaram a metaheurística *Guided Local Search* (GLS) para obter a solução final. O algoritmo se mostrou robusto nos testes realizados em instâncias de *benchmark* propostas inicialmente por Crevier, Cordeau e Laporte (2007) e em outras 54 instâncias que desenvolveram para cobrir diversos problemas reais característicos.

Em relação a coleta de resíduos, Hemmelmayr *et al.* (2013) considerou o *Periodic Vehicle Routing Problem with Intermediate Facilities* (PVRP-IF). Os autores introduziram uma solução híbrida, utilizando o VNS com uma programação dinâmica para inserir instalações intermediárias. Para realização de testes, os autores utilizaram as mesmas instâncias desenvolvidas por Crevier, Cordeau e Laporte (2007) e Tarantilis, Zachariadis e Kiranoudis (2008) e os resultados mostraram que a solução proposta superou ambas as abordagens.

Prescott-Gagnon, Rousseau e Desaulniers (2014) propuseram três metaheurísticas para solucionar o VRPIRF aplicado na distribuição de óleo quente, considerando frota heterogênea, paradas intermediárias para reabastecimento, janelas de tempo e visitas opcionais a clientes. Os autores desenvolveram um algoritmo híbrido, utilizando o TS, a metaheurística *Large Neighborhood Search* (LNS) com base no TS e a heurística *Column Generation* (CG), e testaram em instâncias derivadas de um conjunto de dados da operação real de distribuição de óleo quente. Outros problemas semelhantes ao VRPIRF são encontrados na coleta de resíduos (Angelelli e Speranza, 2002, Kim, Kim e Sahoo, 2006, Coene, Arnout e Spieksma, 2010, Benjamin e Beasley, 2010), na marcação e manutenção de estradas (Amaya, Langevin e Trépanier, 2007 e Salazar-Aguilar, Langevin e Laporte, 2013) e na limpeza de neve (Perrier, Langevin e Campbell, 2007).

Schneider, Stenger e Goeke (2014) sugeriram uma variação do VRPIRF, desenvolvendo uma nova classe de problema denominado *Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations* (E-VRPTW) para atender aplicações reais de logística e a novas leis e regulamentações de emissão de gases estufa. A heurística híbrida combinando o VNS e o TS se mostrou eficaz no suporte das tomadas de decisão do roteamento de veículos comerciais elétricos em operações reais de entrega. Os testes foram realizados em instâncias de *benchmark* e em instâncias desenvolvidas pelo os autores.

Dando continuidade a este tema, Schneider, Stenger e Hof (2015) foram os primeiros a introduzir o *Vehicle Routing Problem with Intermediate Stops* (VRPIS), um modelo que utiliza diferentes tipos de frota e considera visitas a instalações intermediárias para manter os veículos operacionais. O objetivo do VRPIS é minimizar os custos totais, compostos pelos custos da viagem e os custos fixos da utilização dos veículos. Para solucionar este problema, os autores propuseram o algoritmo *Adaptive Variable Neighborhood Search* (AVNS), que foi testado em instâncias de *benchmark* desenvolvidas por Erdogan e Miller-Hooks (2012) no *Green Vehicle Routing Problem* (G-VRP) e por Schneider, Stenger e Goeke (2014) no VRPIRF, que são casos específicos do VRPIS. Os resultados mostraram uma redução considerável no tempo de execução quando comparado com os testes realizados no *solver* CPLEX.

Brandão e Pureza (2015) desenvolveram um modelo linear inteiro misto incorporando planejamento multi período, restrições de janela de tempo em clientes e paradas periódicas, como também algumas características do E-VRPTW com o intuito de propor um roteamento mais eficiente na entrega de produtos lácteos de uma empresa situada no Estado do Pará, que em função da perecibilidade de suas mercadorias, requer que a frota realize paradas periódicas para recarregar as baterias que mantêm o baú dos veículos refrigerados. Diferente dos problemas citados anteriormente, este considera o uso do baú enquanto houver carga no veículo, independentemente se o veículo está em movimento.

Hiermann *et al.* (2016) adaptaram o E-VRPTW e adicionaram a restrição de múltiplos tipos de veículos e tamanhos, introduzindo o *Electric Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows and Recharging Stations* (E-FSMFTW). Neste problema cada veículo tem a possibilidade de recarregar as baterias em estações dedicadas, consumindo uma quantidade de tempo que deve estar dentro da janela estabelecida, dependendo também da distância percorrida e da carga restante da bateria. Isso adiciona complexidade ao problema. Os autores propuseram um método híbrido baseado no *Adaptive Large Neighbourhood Search* (ALNS) ampliado com um mecanismo de intensificação na busca pela solução ótima, que foi testado em instâncias de *benchmark*. Os resultados mostraram a eficácia da abordagem proposta.

O VRPIRF também foi utilizado por Astoures, Rosa e Rosa (2016) para planejar o suprimento de diesel das plataformas offshore, considerando paradas intermediárias de *Platform Supply Vessel* (PSV's) em navios ancorados em alto mar para reabastecer de diesel e realizar as entregas nas rotas pré-determinadas. Este artigo contribuiu com a evolução desse tipo de classe de problemas, trazendo uma nova solução para uma aplicação real que é muito importante para o negócio de petróleo e gás. Para avaliar o modelo matemático, diversas estratégias foram testadas com dados da maior empresa de exploração de petróleo e gás do Brasil.

Montoya *et al.* (2017) foram os primeiros a abordar o E-VRP considerando como uma função não linear o recarregamento das baterias nas estações, o *Electric Vehicle Routing Problem With Nonlinear Charging Function* (E-VRP-NL). Para solucionar o problema os autores propuseram uma metaheurística que combinou o *Iterated Local Search* (ILS) e a *Heuristic Concentration* (HC). Também realizaram

comparações computacionais entre o carregamento não linear e o linear apresentado na literatura. Os resultados mostraram que desconsiderar o carregamento não linear pode levar a soluções excessivamente caras.

Koç *et al.* (2019) introduziram um novo problema na literatura, denominado *Electric Vehicle Routing Problem With Shared Charging Stations* (E-VRP-SCS) que é uma extensão do E-VRP-NL apresentado por Montoya *et al.* (2017) considerando as empresas que investem em conjunto em estações de carregamento. O objetivo era minimizar a soma do custo fixo de abertura das estações, escolhendo a melhor localização e tecnologia, e o custo da rota. Solucionaram com uma heurística ALNS a partir da solução inicial do modelo matemático exato. Os testes em 120 instâncias de *benchmark* demonstraram que a heurística se mostrou aplicável em situações cotidianas de empresas.

Schiffer e Walther (2017) adicionaram instalações intermediárias ao *Location-Routing Problem* (LRP), criando o problema *Location Routing Problem with Intra-route Facilities* (LRPIF) para manter os veículos elétricos operacionais, considerando a janela de tempo de atendimento para recarga total ou parcial das baterias. Os autores criaram instâncias de *benchmark* e utilizaram dados reais obtidos por Schneider, Stenger e Goeke (2014) para realização de testes e aplicaram o ALNS para solucionar o problema. O algoritmo performou melhor em 41 das 56 instâncias consideradas, em relação as abordagens anteriores.

Em outro trabalho Schiffer, Schneider e Laporte (2018) também utilizaram instalações intermediária no LRP, com o objetivo de manter os veículos com combustíveis alternativos operacionais, oferecendo não somente combustível, mas outros serviços requisitados pelos veículos. Assim criaram uma variação do LRPIF, denominado *Location Routing Problem with Intra-route Facilities and Multiple Resources* (LRPIF-MR) Os autores utilizaram o ALNS para solucionar o problema e consideraram instâncias de *benchmark* para os testes. Descobriram que as instalações combinadas ajudam a reduzir os custos gerais da logística e o tamanho da frota.

Schiffer *et al.* (2019) desenvolveram uma revisão da literatura de problemas de roteamento de veículos com paradas intermediárias para reabastecimento. Os autores classificaram as publicações em duas categorias, sendo a primeira quanto a aplicação e a segunda em relação a metodologia. Nesta revisão apresentaram áreas

promissoras para futuras pesquisas e analisaram também os trabalhos sobre a ótica das instâncias de *benchmark* e os algoritmos desenvolvidos.

Erdelic *et al.* (2019) estudaram o E-VRPTW com o acréscimo de políticas de recarga múltipla ou única durante a rota. Restrições reais foram consideradas, como os veículos com capacidade de bateria limitada, janela de tempo do cliente e recarga linear completa nas estações de carregamento. Para solucionar o problema com instâncias de grande porte, os autores aplicaram uma metaheurística ALNS e um método exato para instâncias de menor porte.

Keskin, Laporte e Çatay (2019) estudaram o E-VRPTW considerando tempos de espera do veículo em fila para reabastecimento nas estações. Desenvolveram um modelo matemático para instâncias de menor porte e utilizaram um ALNS para instâncias de maior porte. Tinham por objetivo minimizar o custo de motoristas, energia consumida e penalidades para chegadas tardias. Os resultados mostraram que a espera para recarregar pode aumentar o custo total em até 26%, dependendo do comprimento da fila.

Costés-Murcia, Prodhon e Afsar (2019) apresentaram uma nova classificação para o E-VRP, o *Electric Vehicle Routing Problem With Time Windows, Partial Recharges And Satellite Customers* (E-VRPTWPR). Neste problema considerou-se que o cliente pode utilizar o tempo enquanto o veículo recarrega para realizar outras tarefas, através de outros meios de transporte. Os autores propuseram um modelo matemático e uma metaheurística *Iterated Local Search* (ILS) para instâncias de grande porte. Fizeram testes em instâncias públicas que demonstraram o melhor aproveitamento do tempo gasto nas recargas das baterias.

Lee (2020) desenvolveu um outro trabalho que tratou da função de carga não linear. O objetivo do estudo era desenvolver um algoritmo que minimize os tempos totais de viagem e carregamento das baterias considerando uma função não linear, segmentando as rotas. Para solucionar o problema, desenvolveram um método *Branch-and-Price* (B&P) na rede segmentada. Testes foram feitos em instâncias de *benchmark* e os resultados confirmaram que o algoritmo pode resolver otimamente problemas de tamanho mediano.

Recentemente Meng e Ma (2020) desenvolveram uma nova variação do E-VRP que

considerou janela de tempo e duas formas de reabastecimento do veículo elétrico. Para solucionar o problema os autores desenvolveram um modelo matemático com o objetivo de minimizar o custo do uso do veículo, o custo das rotas e o custo de fornecimento de energia nas estações. Desenvolveram também uma heurística *Ant Colony Optimization* (ACO) que utilizou a solução inicial do modelo. Foram realizados testes com a ACO que demonstrou sua eficiência em dados de uma operação real.

2.2 Multiple Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP)

O MCVRP é uma variação do CVRP, no qual adiciona-se o fato que cada veículo possui dois ou mais compartimentos que recebem diferentes mercadorias. Os compartimentos, mesmos após esvaziados, não devem receber uma mercadoria diferente do que foi previamente armazenado, a fim de evitar contaminação por possíveis sobras que ficam no compartimento. Este problema se diferencia também por utilizar uma frota que atenderá às demandas de um ou mais tipos de mercadorias de um cliente com somente um veículo, respeitando a capacidade máxima de cada compartimento (SILVESTRIN e RITT, 2017). Na Figura 4 é possível observar exemplos de veículos com múltiplos compartimentos.

Figura 4 - Tipo de veículo com múltiplos compartimentos



Fonte: do Autor (2020).

Este tipo de veículo é largamente utilizado em distribuição de produtos derivados do petróleo (BENANTAR e OUAFI, 2012), coleta seletiva de resíduos (HENKE, SPERANZA e WÄSCHER, 2015), coleta de azeite (LAHYANI *et al.*, 2015) e distribuição de encomendas em locais com restrição de acesso (HÜBNER e OSTERMEIER, 2019), situação que será abordada na dissertação. Mesmo com grande aplicação, o MCVRP não tem sido estudado extensivamente em aplicações na logística urbana. Portanto, essa dissertação possui relevância significativa no crescimento desta classe de problema. Além da classe citada encontramos na literatura problemas com taxonomia diferentes, mas que representam extensões do MCVRP, como é o caso do *Petrol Station Replenishment Problem* (PSRP) e o *Fuel Replenishment Problem* (FRP). A seguir, é apresentado a revisão de cada um destes artigos.

2.2.1 Revisão Bibliográfica do *Multiple Compartment Vehicle Routing Problem* (MCVRP)

Brown e Gaves (1981) foram os primeiros a considerar caminhões-tanque para transportar diferentes tipos de derivados do petróleo, contando que cada veículo tinha vários compartimentos. Para distribuir os produtos petrolíferos para uma importante companhia petrolífera dos EUA, os autores desenvolveram um sistema automatizado de alocação dos caminhões em tempo real.

Abdelaziz, Roucairol e Bacha (2002) desenvolveram a heurística *Variable Neighbourhood Search* (VNS) para abordar o MCVRP nas entregas de produtos derivados do petróleo na Tunísia. Buscaram reduzir os custos de entrega, no entanto, concluíram que a heurística estava distante de capturar a complexidade do problema, por não cogitarem características reais do problema, como a janela de tempo do cliente.

O trabalho apresentado por Chajakis e Guignard (2003) tratou do transporte de diversas mercadorias, envolvendo veículos refrigerados e não-refrigerados, que

possuíam compartimentos de tamanhos diferentes. Para resolver o problema os autores elaboraram dois modelos matemáticos e Relaxação Lagrangeana para resolver o problema. Os resultados computacionais mostraram que o algoritmo pode ser utilizado em situações reais.

Para o problema real de distribuição de gasolina em bombas de combustível Avella, Boccia e Sforza (2004) consideraram somente um caminhão para atender às ordens que eram enviadas em vários caminhões. Eles propuseram uma solução que usou um algoritmo *Savings-based Routing* (SR) para a geração de rotas e uma heurística *Best Fit Decreasing* (BFD) para o problema de dimensionamento do compartimento. Para resolução de instâncias com até 60 postos, eles também desenvolveram um método exato que usa um algoritmo *Branch-and-Price* (B&P).

Para solucionar o MCVRP e integrar com o sistema Geo-Rota, que armazena os dados de roteirização, Póvoa, Nogueira e Paula Junior (2005) apresentaram uma meta-heurística denominada *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP). Dentre os dados armazenados pelo Geo-Rota estão a localização das vias de acesso, os pontos de entrega aos clientes e a topologia viária. A meta-heurística se mostrou robusta.

Com o intuito de se aproximar das restrições da operação real, Lisboa (2007) baseou-se no problema apresentado por Póvoa, Nogueira e Paula Junior (2005) e acrescentou a janela de tempo. Os resultados comprovaram a robustez do algoritmo e a possibilidade de aplicá-lo em um roteamento diário em trechos urbanos e intermunicipais, bastando calibrar os parâmetros com as características pertinentes a cada caso.

El Fallahi, Prins e Calvo (2008) propuseram dois algoritmos diferentes para solução de uma generalização do problema de múltiplos compartimentos, o *Memetic Algorithm* (MA) e a TS. Os autores consideraram que cada compartimento é dedicado para uma mercadoria específica, onde cada uma pode representar diferentes tipos de produtos, mas que possuem características comuns que exijam um compartimento específico. Os algoritmos foram testados usando dois conjuntos de instâncias de *benchmark*, obtidos pela adaptação de vinte cenários conhecidos na literatura. Como resultado, na comparação, a TS forneceu melhores resultados do que o MA.

Muyldermans e Pang (2010) implementaram os algoritmos *Local Search Procedures* (LSP), no qual foi incrementado com uma combinação de *local search moves*: *relocate*, *Exchange* e *cross*, e o *Neighbour Lists* (NL) para determinar se utilizar veículos com múltiplos compartimentos é mais vantajoso quando comparado com veículos de único compartimento na coleta de resíduos urbanos. Os autores utilizaram uma frota homogênea de compartimentos fixos, onde diferentes mercadorias de um mesmo cliente poderiam ser coletadas por mais de um veículo, porém uma mesma mercadoria não poderia ser dividida em diferentes rotas. Como resultado, foi determinado que problemas de roteirização de veículos com múltiplos compartimentos são complexos e precisam de melhorias, porém em muitos casos, a utilização desses tipos de veículos, quando comparada com veículos de um único compartimento, é mais efetiva.

Reed, Yiannakou e Evering (2014) utilizaram a meta-heurística *Ant Colony System* (ACS) para resolver o MCVRP no contexto da coleta de resíduos residenciais para a reciclagem. Cada compartimento dos veículos foi destinado a um tipo de resíduo. Por fim, os autores sugeriram o aprofundamento dos estudos deste problema, desenvolvimento de *benchmark* e a utilização de outras meta-heurísticas.

Para a coleta de azeite de oliva na Tunísia, Lahyany *et al.* (2015) sugeriram um modelo matemático e o algoritmo *Branch and Cut* (B&C) para o MCVRP, incluindo as restrições de múltiplas viagens e carga heterogênea. A coleta do azeite de oliva é particularmente importante durante os quatro meses de produção. O tempo de operação é crucial, pois demanda recursos humanos e materiais com alto custo fixo. A atividade é realizada por uma frota de veículos diferentes com compartimentos de iguais ou diferentes capacidades, que coletam a produção de diferentes agricultores geograficamente dispersos pela Tunísia. O azeite deve ser coletado antes que o produtor fique sem espaço de armazenagem. Os autores garantiram que o modelo pode ser adaptado para outras indústrias e hipóteses. No entanto, o modelo proposto por eles não controla a quantidade de carga em cada compartimento quando chega a um cliente. A eficácia do modelo na tomada de decisões técnicas foi demonstrada a partir de testes em instâncias de situações reais, como na compra de novos veículos, e operacionais, como na projeção de carregamento de veículos ou

mudança de rotas.

Diferentemente dos demais artigos publicados sobre o MCVRP, Henke, Speranza e Wäscher (2015) aplicaram uma solução heurística baseada na VNS no contexto do problema de coleta de resíduos de vidro, para posterior produção de novos vidros. Para tal, os vidros devem ser colocados em diferentes compartimentos de acordo com a sua tonalidade, visto que vidros de cores diferentes não podem ser misturados pois prejudica a qualidade dos novos vidros produzidos. Assim, a proposta inicial foi de que o tamanho dos compartimentos dos veículos não fosse fixo, mas que fosse determinado individualmente para cada veículo ou rota. Divisórias iriam ser introduzidas em posições específicas e pré-determinadas para delimitar o tamanho do compartimento e, o número de compartimentos poderia ser igual ou menor do que os diferentes tipos de cores dos vidros. Além disso, um cliente poderia ser atendido por mais de um veículo desde que seja para coletar vidros de diferentes cores, ou seja, um cliente não poderá ser atendido mais de uma vez se for para a coleta de uma mesma mercadoria. Deste modo, testes foram realizados em instâncias reais e de *benchmark*. O resultado obtido foi de que somente problemas com um número limitado de clientes podem ser resolvidos em um tempo computacional razoável.

Koch, Henke e Wäscher (2016) estudaram o MCVRP, acrescentando a flexibilidade do tamanho dos compartimentos. Desta forma, os autores criaram o *Multi-Compartment Vehicle Routing Problem with Continuously Flexible Compartment Sizes* (MCVRP-CFCS) para tratar dessa nova característica. Até então este acréscimo no problema de múltiplos compartimentos só haviam sido estudado por Henke, Speranza e Wäscher (2015), que considerava tamanhos de compartimentos de um conjunto pré-determinado (flexibilidade discreta), enquanto esse se diferencia por considerar tamanhos de compartimentos que podem ser arbitrariamente selecionados (flexibilidade contínua). Somente instâncias de pequeno porte podem ser resolvidas com tempo computacional razoável de forma ótima com o MCVRP-CFCS. Para instâncias de grande porte, os autores propuseram um *Genetic Algorithm* (GA). Testes foram realizados e os resultados mostraram que, especialmente em situações de planejamento de muitos tipos de mercadorias e compartimentos, a possibilidade de variar o tamanho do compartimento arbitrariamente pode levar a uma significativa economia nos custos gerais em

comparação com os compartimentos discretamente flexíveis.

Para resolver o MCVRP, Silvestrin e Ritt (2017) propuseram a heurística TS incorporada ao algoritmo *Iterated Local Search* (ILS), considerando também a possibilidade de realizar múltiplas visitas. Comparações com outros algoritmos existentes foram realizadas e, diferentemente das abordagens anteriores, as demandas para diferentes tipos de mercadoria podem ser atendidas em várias visitas sem a sobrecarga do atendimento de cada demanda separadamente. Os autores realizaram testes em instâncias de *benchmark* e encontraram soluções melhores do que alguns algoritmos existentes na literatura.

Yahyaoui *et al.* (2018) utilizaram duas meta-heurísticas para solucionar o MCVRP, o *Adaptive Variable Neighborhood Search* (AVNS) e a *Partially Matched Crossover PMX*, baseado no *Genetic Algorithm* (GA). Os autores utilizaram instâncias de *benchmark* e comparam os resultados das meta-heurísticas com um modelo matemático. O AVNS obteve melhores resultados que o modelo matemático para todas as 18 instâncias de pequeno porte. Com instâncias de grande porte a meta-heurística foi melhor em 12 das 14 instâncias consideradas.

Alinaghian e Shokouhi (2018) apresentaram o *Multi-Depot Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MD-MCVRP) onde consideraram a entrega fracionada de um conjunto de mercadorias por meio de diferentes veículos. Utilizaram a meta-heurística AVNS para solucionar instâncias de grande porte, comparando com resultados obtidos com o modelo proposto. O algoritmo obteve bom desempenho e se mostrou robusto.

Mofid-Nakhaee e Barzinpour (2019) investigaram o *Multi-Compartment Capacitated Arc Routing Problem with Intermediate Facilities* (MCCARPIF) na coleta de resíduos granéis sólidos e a modelagem em arco. Utilizaram os algoritmos *Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm* (ALNS) e o ALNS híbrido com o algoritmo de otimização de baleias. Consideraram um estudo de caso real em Teerã. Os resultados mostraram que o uso de veículos com vários compartimentos é mais econômico do que o uso de veículos de um único compartimento.

Kaabachi *et al.* (2019) estudaram o MCVRP em aplicação numa transportadora de combustível na Itália. Para solucionar o problema propuseram um modelo

matemático para instância de pequeno porte e dois algoritmos para instâncias de grande porte, um *Hybrid Artificial Bee Colony* (HABC) e um *Hybrid Self-Adaptive General Variable Neighborhood* (HSAGVN). Os autores compararam seus resultados com os encontrados na literatura. Tasar, Eliyi e Kandiller (2019) seguiram na mesma linha de raciocínio e estudaram o MCVRP. Solucionaram instâncias de pequeno porte com um modelo matemático que considerou também múltiplas viagens e entregas divididas. Para instâncias de grande porte desenvolveram duas heurísticas, uma *Variable Neighborhood Search* (VNS) e uma *Greedy Remove/Insert* (GRI). Os resultados são promissores para as heurísticas.

Recentemente Chowmali e Sukto (2020) propuseram uma abordagem em duas fases para resolver o MCVP aplicado ao *Fuel Replenishment Problem* (FRP). Formularam um modelo matemático *Mixed-Integer Linear Programming* (MILP) e um outro modelo *Generalized Assignment Problem* (GAP). Os testes feitos com dados de um estudo de caso de vinte postos de gasolina no nordeste da Tailândia demonstraram que os modelos conseguem resolver satisfatoriamente instâncias de pequeno porte. Wang, Kinable e Woensel (2020) também estudaram o MCVRP aplicado ao FRP, diferenciando-se com entregas fracionadas e múltiplas viagens. Eles propuseram uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search Algorithm* (ALNS) para solucionar o problema. Foram realizados testes com dados reais de uma companhia chinesa de transporte de gasolina. Além destes testes, realizaram análises de sensibilidade em diferentes características do problema, como por exemplo variação do compartimento dos veículos e produtos transportados. Os resultados mostraram a grande eficiência do ALNS para solucionar instâncias de mais de 60 clientes e 3 diferentes produtos.

Benantar, Ouafi e Boukachour (2020) discutiram o *Petrol-station Replenishment Problem with Adjustable Demands* (PSRP-AD) em que a distribuidora, em acordo com os postos de gasolina, pode reduzir a entrega até um limite inferior a demanda solicitada, a fim de reduzir os custos de distribuição. Os autores propuseram um modelo matemático para ter soluções iniciais. Posteriormente propuseram uma heurística Tabu Search (TS). A partir de testes realizados com instâncias de *benchmark* e dados reais, concluíram que o algoritmo obteve resultados melhores do que o método de entrega atual utilizado pelas empresas.

Estehadi, Demir e Huang (2020) abordaram um tema próximo do proposto neste trabalho, mas sem considerar restrição de acesso, múltiplos depósitos e o recarregamento em armazéns intermediários. Estudaram o MCVRP aplicado a logística na cidade. Para solucionar o problema propuseram um algoritmo (ALNS) melhorado. Os resultados mostraram a eficiência do algoritmo em relação a logística na cidade, a qualidade e no tempo para obter a solução.

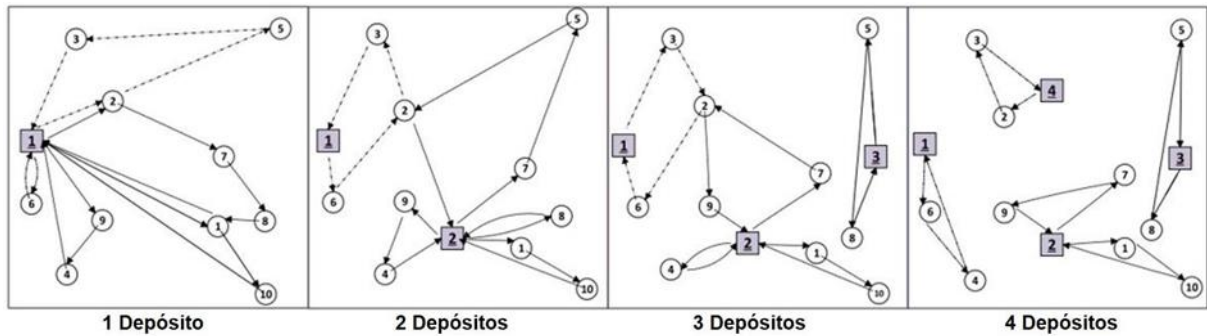
2.3 Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)

No *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) são disponibilizados mais de um armazém central no qual uma frota sairá e irá atender clientes pré-designados a partir de qualquer um dos armazéns. O MDVRP é um problema que está presente no cotidiano, sendo utilizado por empresas de grande porte que possuem múltiplos armazéns centrais, como é o caso da Coca-Cola (ZHANG *et al.*, 2015).

O objetivo do MDVRP é minimizar a distância total percorrida nas rotas e o número de veículos utilizados, alocando a demanda de cada cliente para cada depósito, sob a condição de que a capacidade de suprimento de cada armazém e de cada veículo não pode ser excedida, a rota de cada veículo inicia e termina no mesmo depósito e um cliente é atendido uma única vez por um veículo (SHI *et al.*, 2020).

Alinaghian e Shokouhi (2018) estudaram o *Multi-Depot Multi-Compartment Vehicle Routing Problem* (MDMCVRP) resolvendo-o com uma heurística *Hybrid Adaptive Large Neighborhood Search* (HALNS). Os autores chegaram à conclusão que múltiplos armazéns centrais e múltiplos compartimentos podem levar a uma solução mais eficiente aplicado a instâncias criadas aleatoriamente, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 - Mudança de rotas dos veículos ao aumentar a quantidade de depósitos



Fonte: Adaptado de Alinaghian e Shokouhi (2017).

A seguir são apresentados a revisão dos artigos relacionados e este tipo de problema.

2.3.1 Revisão Bibliográfica do *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP)

Wren e Holliday (1972) foram um dos primeiros que apresentaram o MDVRP. Apresentaram um novo algoritmo que construía rotas simultâneas de vários armazéns centrais. Os autores compararam os resultados obtidos com vários armazéns e os com armazém único. Na mesma época houve grande evolução no desenvolvimento do problema com os trabalhos de Cassidy e Bennet (1972), Gillett e Johnson (1976), Laporte (1984), Kulkarni e Bhave (1985), Renaud *et al.* (1996) e Cordeau *et al.* (1997).

Polacek, Hatl e Doerner (2004) foram pioneiros ao propor uma heurística baseada no *Variable Neighborhood Search* (VNS) para solucionar o MDVRP considerando também a janela de tempo de atendimento no cliente. Os autores realizaram testes com as instâncias propostas por Cordeau, Laporte e Mercier (2001), que na ocasião utilizaram uma heurística *Tabu Search* (TS). Os resultados computacionais mostraram que a abordagem por VNS é mais competitiva que por TS em relação aos tempos computacionais e a qualidade da solução.

Ho *et al.* (2008) estudaram a aplicação de uma nova heurística denominada *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA) ao MDVRP. Ela é híbrida por ser desenvolvida em duas etapas. A primeira (HGA1) gera as soluções aleatoriamente. Já a segunda (HGA2) incorpora o método de economia de Clarke e Wright e a heurística *Nearest Neighbor*

(NN). Os autores provaram que HGA2 é superior ao desempenho de HGA1 em relação ao tempo total dos veículos em rota.

Yu, Yang e Xie (2011) estudaram o problema MDVRP considerando um armazém central virtual. Para solucioná-lo apresentaram uma heurística *Ant Colony Optimization* (ACO) aprimorada com a estratégia de alteração do peso das formigas. Fizeram testes em 23 instâncias de *benchmark* e compararam os resultados com outros trabalhos baseados no ACO. Houve uma redução nos custos em todas as instâncias testadas.

Avançando no tempo Salhi, Imran e Wassan (2014) apresentaram o MDVRP considerando uma frota heterogênea de veículos. Para soluções iniciais desenvolveram um modelo matemático testado no CPLEX. Propuseram também uma heurística VNS que inclui novos recursos, como a adaptação de várias vizinhanças, pré-processamento para identificar clientes limítrofes e um mecanismo que agrega e desagrega rotas entre armazéns centrais que reduziu quase em 80% o tempo de execução, especialmente em grandes instâncias. Os resultados produziram 23 novos melhores resultados quando testado com as 26 instâncias da literatura aplicadas ao modelo matemático.

Zhang *et al.* (2015) estudaram o problema de múltiplos armazéns centrais considerando frota heterogênea e janela de tempo de atendimento no cliente. Para isso desenvolveram um modelo matemático que englobou várias restrições encontradas no cotidiano. Os testes foram feitos em instâncias baseadas em dados reais, mas também em instâncias de problemas de *benchmark*. Os autores mostraram resultados satisfatórios e que o modelo matemático se mostrou facilmente adaptável com aplicação em outros VRPs.

Li, Li e Pardalos (2016) foram os primeiros a propor uma variação do MDVRP considerando que o término da rota de um veículo é flexível, podendo ser no mesmo armazém central inicial ou não. Os autores propuseram um modelo de programação inteira considerando restrições encontradas na realidade, como janela de tempo de atendimento no cliente, capacidade do veículo, tamanho da frota e o número de vagas em cada armazém. Por ser um problema NP-Hard, eles também propuseram um *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA) com a adição do *Adaptative Local Search* (ALS). O método se mostrou competitivo em relação a qualidade da solução. Os autores

ressaltam que a flexibilidade no término da rota pode reduzir ainda mais os custos inerentes.

Chen e Yang (2017) estudaram o conceito de equilíbrio total do tráfego urbano para modelar o MDVRP, levando em conta a influência dos veículos de *delivery* no tráfego urbano. Os autores transformaram o MDVRP em um algoritmo, que agrupa clientes, faz uma estimativa de tráfego origem/destino e por fim designa o tráfego, e usaram programação em dois níveis para modelar o problema. Como resultado, o modelo forneceu um tempo menor de *delivery* e ajudou a evitar congestionamentos em vias que já são saturadas.

Em 2018 Stodola apresentou um novo problema baseado no MDVRP, denominado *Modified Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (M-MDVRP). A modificação consiste em alterar o critério de otimização. O MDVRP clássico tem por objetivo minimizar a soma total de rotas de todos os veículos, enquanto o M-MDVRP tem por objetivo minimizar o tempo para realizar a operação em rota. Para isso o autor desenvolveu uma metaheurística baseada no ACO que incluiu também um processo de otimização determinística que aprimorou ainda mais o algoritmo ACO original. Testes foram realizados em instâncias de *benchmark* de Cordeau. Os resultados encontrados mostraram que a ACO obteve melhores tempos de resolução e custo da realização da operação das rotas. Em 2020, o mesmo autor aprimorou a metaheurística adicionando princípios da heurística *Simulated Annealing* (SA). Os testes com as mesmas instâncias de Cordeau mostraram que o algoritmo supera os outros métodos, pois possui o menor erro médio, que nada mais é que a diferença entre a solução encontrada e a solução mais conhecida.

Azadeh e Farrokhi-Asl (2019) combinaram o MDVRP com o *Close-Open Mixed Vehicle Routing Problem* (COMVRP), considerando uma frota heterogênea. Para solucionar o problema, os autores propuseram um *Mixed Integer Programming* (MIP) e um HGA. O modelo exato e a heurística foram testadas e comparadas, e o último apresentou melhores resultados principalmente por conseguir reduzir o tempo para obtenção da solução e por executar instâncias maiores.

Li, Soleimani e Zohal (2019) apresentaram uma heurística *Improved Ant Colony Optimization* (IACO), com alteração de feromônio para solucionar o *Multi-Depot Green Vehicle Routing Problem* (MDGVRP). Eles visaram maximizar a receita,

minimizando custos, tempo e emissão de poluentes. Os resultados apresentaram que o IACO obteve desempenho superior a ACO convencional, em testes realizados em instâncias de *benchmark*.

Shi *et al.* (2020) estudaram o MDVRP aplicado a coleta de resíduos com o objetivo de minimizar a distância total de transporte. Para solucionar o problema, eles propuseram uma heurística que primeiramente atribui pontos de coleta de resíduos às plantas de disposição de acordo com a menor distância. Em seguida, planeja a ordem de atendimento dos clientes. Na última etapa os autores definiram um algoritmo *Sector Combination Optimization* (SCO) para gerar soluções iniciais. Com estas soluções aplicaram a estratégia *Merge-Head And Drop-Tail* (MHDT). Os testes em instâncias de *benchmark* mostraram que o SCO conseguiu gerar muitas soluções iniciais de melhor qualidade que outros algoritmos iterativos.

Samsuddin, Othman e Yusuf (2020) propuseram duas metaheurísticas para solucionar o MDVRP. A primeira foi a ACO e a segunda foi o *Intelligent Water Drop* (IWD) com adição de técnicas de SA. Os autores utilizaram seis conjuntos de instâncias de Cordeau. Os resultados mostraram que o IWD é mais eficiente em achar solução ótima do que a ACO.

Ramos, Gomes e Póvoa (2020) estudaram o MDVRP com armazéns dispostos nas rotas. A principal diferença deste problema é que os veículos podem reiniciar sua capacidade em qualquer armazém durante o atendimento em rota. Para solucionar instâncias de grande porte os autores propuseram uma metaheurística que associa uma formulação *Mixed Integer Linear Programming* (MILP) com um conjunto de estratégias *relax-and-fix*. Segundo os autores, essa formulação foi a primeira a conseguir executar de forma eficiente instâncias de grande porte.

Recentemente, Zhen *et al.* (2020) investigaram o MDVRP considerando restrições reais, como múltiplas viagens, data para entrega e janela de tempo de atendimento no cliente. Os autores formularam inicialmente um *Mixed Integer Programming Model* (MIPM). Para solucionar o problema, os autores desenvolveram dois algoritmos, um *Hybrid Particle Swarm Optimization* (HPSO) e um *Hybrid Genetic Algorithm* (HGA). Os resultados mostraram que os algoritmos conseguem resolver algumas instâncias de grande porte com até 200 clientes, 20 depósitos e 40 veículos em tempo razoável.

2.4 Site-Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP)

No *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP) existem restrições provenientes dos tipos de veículos e localização geográfica dos clientes que devem ser respeitadas para solução do problema. Neste caso existe um conjunto de tipo de veículos heterogêneos que podem ser aceitos ou não para atender as demandas de determinados clientes (LIN *et al.*, 2014).

Ele considera basicamente a restrição dos tipos de veículos que tem a autorização e a capacidade de transitar por determinadas vias, devido às limitações impostas pelas leis de trânsito e cidades (PESSOA, SADYKOV e UCHOA, 2018). Além disso, o SDVRP, como uma variante do CVRP, deve atender à todas as restrições do problema original. A seguir são apresentados a revisão dos artigos relacionados e este tipo de problema.

2.4.1 Revisão Bibliográfica do *Site-Dependent Vehicle Routing Problem* (SDVRP)

Nag, Golden e Assad (1988) foram os primeiros a abordar o SDVRP onde construíram quatro heurísticas para resolver o problema. As três primeiras têm como base o *Generalized Assignment Method* (GAM), desenvolvido inicialmente por Fisher e Jaikumar (1981). A última é a heurística *One-Pass Construction* (O-PC) que usou conceitos de varredura. As heurísticas foram aplicadas a um conjunto de 12 instâncias construídas pelos autores e duas heurísticas GAM obtiverem melhores resultados.

Chao, Golden e Wasil (1998) tomaram como base o trabalho de Nag, Golden e Assad (1988) e desenvolveram um novo algoritmo que consiste em duas etapas. A primeira tem o objetivo de obter soluções viáveis rapidamente, enquanto a segunda aprimora a solução obtida na primeira etapa por meio de uma sequência de subidas e descidas realizadas no algoritmo. Os autores testaram o algoritmo nas mesmas instâncias criadas no trabalho base, e os resultados se mostraram superiores a todos os métodos anteriores apresentados. Em 1999, Chao, Golden e Wasil utilizaram o algoritmo desenvolvido por eles em 1998 como base para desenvolver

uma nova heurística. Fizeram testes com 23 novas instâncias e obtiveram resultados razoáveis para problemas de tamanho mediano.

Cordeu e Laporte (2001) foram um dos primeiros a publicarem sobre o SDVRP enfatizando que este é um caso especial do *Periodic Vehicle Routing Problem* (PVRP). Desenvolveram uma heurística *Tabu Search* (TS) para resolver o problema e sua extensão com janela de tempo, utilizando instâncias de *benchmark* para teste. Segundo os autores o algoritmo proposto superou todos os métodos publicados anteriormente.

Passados alguns anos, Pisinger e Ropke (2007) apresentaram uma heurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS) capaz de resolver o SDVRP e quatro outros problemas de roteamento, o *Vehicle Routing Problem with Time Windows* (VRPTW), o *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP), o *Multi-Depot Vehicle Routing Problem* (MDVRP) e por fim o *Open Vehicle Routing Problem* (OVRP). Os autores realizaram testes em 669 instâncias de *benchmark* encontrados na literatura que envolviam todos os cinco problemas citados anteriormente. Os resultados foram promissores e resolveram inclusive outros problemas de roteamento de veículos satisfatoriamente.

Buhrkal, Larsen e Ropke (2012) apresentaram um trabalho sobre coleta de lixo em centros urbanos. Para isso, desenvolveram um algoritmo ALNS, respeitando as restrições de janela de tempo e acesso dos clientes, garantindo que os motoristas tenham seus intervalos definidos por lei e que todo o lixo seja destinado aos locais corretos de descarte. Os resultados alcançados demonstraram redução nos custos da operação em relação a instâncias de *benchmark* e instâncias fornecidas por uma empresa dinamarquesa de coleta de lixo.

Cordeau e Maischberger (2012) desenvolveram uma heurística *Parallel Iterated Tabu Search* (PITS) que utiliza um mecanismo de perturbação simples, garantindo ampla exploração do espaço de pesquisa, para solucionar o SDVRP e mais três outros problemas de roteamento de veículos, o CVRP, o *Periodic Vehicle Routing Problem* (PVRP), e o MDVRP. A esses problemas foi acrescentado a restrição de janela de tempo. Os resultados mostraram-se promissores e melhores do que quando aplicado ao *Tabu Search* (TS) unicamente.

Ainda em 2012, Amorim *et al.* apresentaram uma nova classe de problema denominada *Heterogeneous Fleet Site Dependent Vehicle Routing Problem With Multiple Time Windows* (HFSDVRPMTW) e utilizaram uma heurística ALNS para validar os resultados do modelo matemático. O algoritmo se mostrou eficaz nos testes realizados com dados de uma empresa portuguesa de distribuição de alimentos, no qual convergiu rapidamente para solução ótima e ajudou a reduzir os custos operacionais.

Diferentemente dos outros autores Zare-Reisabadi e Mirmohammadi (2015) apresentaram um *Ant Colony System* (ACS) e um TS para solucionar instâncias de grande porte de uma variação do SDVRP, o *Site-Dependent Vehicle Routing Problem with Soft Time Window* (SDVRPSTW). Apresentaram também um modelo *Integer Linear Programming* (ILP) para validar as meta-heurísticas. Os testes em instâncias experimentais mostraram que o ACS trouxe melhores resultados quando comparado com o TS.

Sicilia *et al.* (2016) desenvolveram um trabalho que utilizou um modelo matemático para testes iniciais que teve dificuldade para lidar com o grande número de elementos combinatórios gerados a partir do problema de entregas em grandes centros urbanos. Para lidar com esta complexidade, utilizaram as heurísticas *Variable Neighborhood Descent* (VND), *General Variable Neighborhood Search* (GVNS) e TS. Os testes foram realizados em instâncias geradas a partir de dados reais da maior companhia de transporte de mercadorias da Espanha. Segundo os autores, os algoritmos foram capazes de solucionar instâncias reais com centenas de ordens, como também encontrar soluções com um tempo razoável.

Naccache, Côté e Coelho (2018) investigaram o *Multi-Pickup and Delivery Vehicle Routing Problem with Time Windows* (MPDVRPTW) aplicado às coletas e entregas em centros urbanos de um conjunto de clientes utilizando veículos pré-determinados. Desenvolveram também uma heurística ALNS para tratar de instâncias de grande porte. Os autores testaram os algoritmos em instâncias de diferente tamanhos e destacaram o desempenho da heurística em comparação com o modelo matemático.

Pessoa, Sadykov e Uchoa (2018) apresentaram um algoritmo Branch-Cut-Price (BCP) para solucionar os problemas clássicos VRP de forma aprimorada que

algoritmos exatos, levando em consideração a possibilidade de alocação de armazéns centrais, custos de veículos diferentes por capacidade e de clientes poderem ser visitados por determinado subconjunto de veículos. Após os testes realizados, os autores identificaram que o algoritmo se mostrou significativamente melhor que os algoritmos base, encontrando soluções ideais para instâncias de mais de 200 clientes em um tempo razoável.

Como apresentado anteriormente, existem estudos sobre a roteirização de veículos com reabastecimento intermediário em armazéns intermediários e considerando múltiplos compartimentos, múltiplos depósitos e restrição de acesso ao cliente, porém não foram encontrados artigos que retratassem estes quatro problemas, considerando também a janela de tempo de atendimento ao cliente e armazém intermediário, e a alocação de cada caixa em cada compartimento dos veículos, aplicados em conjunto no planejamento de entregas urbanas, criando assim uma nova classe do problema de roteirização de veículos.

Os artigos fundamentais para desenvolvimento desta dissertação foram Zare-Reisabadi e Mirmohammadi (2015), Schneider, Stenger e Hof (2015), Astoures, Rosa e Rosa (2016), Schiffer e Walther (2017), Mofid-Nakhaee e Barzinpour (2019), Schiffer *et al.* (2019) e Ramos, Gomes e Póvoa (2020).

Na Tabela 1 são apresentados os principais artigos publicados sobre o VRPIRF, o MCVRP, o MDVRP e o SDVRP com suas características. Na última linha da tabela são apresentadas as principais características do modelo matemático proposto neste trabalho, podendo evidenciar suas diferenças para os demais modelos.

Tabela 1 - Resumo dos Artigos Publicados sobre o VRPIRF, o MCVRP, o MDVRP e o SDVRP

Referências	Rev.	Ano	Características Operacionais																				Função Objetivo													
			Janela de Tempo	Restrição de Acesso	Frota Heterogênea	Frota Homogênea	Cliente é atendido somente por um veículo	Cliente é atendido por mais de um veículo	Múltiplas Viagens	Reabastecimento Intermediário	Entrega Fracionada	Reabastecimento Parcial	Recurso infinito nos depósitos e facilidades	Múltiplos recursos/serviços	Capacidade limitada para entregas	Reabastec. linear das baterias da frota	Reabastec. não linear das baterias da frota	Limitação de pontos de reabastec. baterias	Capacidade limitada de carga da bateria	Múltiplos Depósitos	Escolha Flexível Depósito Final	Múltiplos Compartimentos	Compartimentos Fixos	Compartimentos Variáveis	Planejamento de Entregas em Cidades	Alocação Independente das Caixas	Compat. e fila de espera de estações recarga	Minimização Danos Ambientais	Revisão da Literatura	Tipo de produto	Minimizar custos operacionais	Minimizar o tempo total de viagem	Minimizar distância total percorrida	Minimizar número de veículos	Minimizar Custo abertura estação de recarga	Técnicas Utilizadas
Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilities (VRPIRF)																																				
Ghiani, Improta e Laporte	Netw orks	2001		x		x		x		x		x		x														-	x						MM	
Crevier, Cordeau e Laporte	ORL	2007		x		x		x		x		x		x														-			x				AMP, TS, IP	
Polacek <i>et al.</i>	JH	2008	x		x	x		x		x		x		x														CN			x	x			VNS	
Tarantilis, Zachariadis e Kiranoudis	JC	2008		x		x		x		x		x		x														PD	x		x				TS, VNS, GLS	

Hemmelmayr <i>et al.</i>	JH	2013		x	x	x		x	x			RS		x	TS, LNS, CG		
Prescott-Gagnon, Rousseau e Desaulniers	FSMJ	2014	x		x	x	x		x			O Q		x	VNS		
Schneider, Stenger e Goeke	TS	2014	x		x	x	x	x	x			PD	x	x	x	VNS, TS	
Schneider, Stenger e Hof	ORS	2015		x	x	x	x		x			PD	x	x	x	AVNS	
Brandão e Pureza	Anpet	2015	x		x	x	x		x	x	x	PL	x	x		MM	
Hiermann <i>et al.</i>	EJO R	2016	x	x	x	x	x		x	x		PD		x	x	ALNS	
Astoures, Rosa e Rosa	TRP	2016		x	x	x	x		x			PD P	x	x	x	MM	
Montoya <i>et al.</i>	TRB	2017		x	x	x			x			PD	x	x		ILS, HC	
Schiffer e Walther	TS	2017	x	x	x	x			x	x		PD	x		x	ALNS	
Schiffer, Schneider e Laporte	EJO R	2018	x	x	x	x		x	x	x		PD	x		x	ALNS	
Koç <i>et al.</i>	ITOR	2019		x	x	x		x		x	x		PD	x	x	x	MILP, ALNS
Schiffer	TS	2019										x	-			-	
Erdelic <i>et al.</i>	TRP	2019	x		x	x	x		x		x	PD	x			MILP, ALNS	
keskin, Laporte e Çatay	COR	2019	x	x	x	x			x		x	PD	x		x	MILP, ALNS	
Cortés-Murcia, Prodhon e	TRE	2019	x	x	x	x	x		x		x	PD	x	x		MM, ILS, VNS	

Afsar

Lee	JOR S	2020		x	x	x			x	x		PD	x	x		B&P
Meng e Ma	AOR	2020	x					x	x	x		PD	x	x	x	MM
Multi-Compartment Vehicle Routing Problem (MCVRP)																
Brown e Gaves	MS	1981			x	x						PD P	x		x	SAA
Abdelaziz, Roucairol e Bacha	IEE	2002	x	x	x							PD P	x			VNS
Chajakis e Guignard	JGO	2003			x	x						PD				MM
Avella, Boccia e Sforza	EJO R	2004		x	x			x				PD P	x		x	SR, BFD, BP
Póvoa	-	2005		x	x							-	x			GRASP
Lisboa	-	2007	x	x	x							-	x			GRASP
El Fallahi, Prins e Calvo	COR	2008		x	x							PD	x			MA, TS
Muyldermans e Pang	EJO R	2010			x	x						CR L			x	LSP
Reed, Yiannakou e Evering	ASC	2014			x	x		x				CR L			x	ACS
Lahyani et al.	Ome ga	2015		x	x			x				PD	x			B&C
Henke, Speranza e Wäscher	EJO R	2015			x	x						CR V	x			VNS
Koch, Henke e Wäscher	FEM	2016		x	x							PD	x		x	GA
Silvestrin e	COR	2017		x	x	x						PD	x			ITS

Ritt

Yahyaoui <i>et al.</i>	ORIJ	2018		x	x				x	x		PD P		x		AVNS, GA	
Alinaghian e Shokouhi	Ome ga	2018		x		x		x	x	x		PD		x	x	ALNS, VNS	
Mofid-Nakhaee e Barzinpour	WM& R	2019		x		x		x		x	x	CR L	x		x	ALNS	
Kaabachi <i>et al.</i>	MSR T	2019			x	x				x	x	PD			x	x	MM, HABC, HSGVN
Tasar, Eliyi e Kandiller	TM	2019		x		x		x		x	x	PD	x				MM, VNS, GRI
Chowmali e Sukto	DSL	2020		x		x				x	x	PD P			x	x	MILP, GAP
Wang, Kinable e Woensel	COR	2020		x		x		x		x	x	PD P	x				MILP, ALNS
Benantar, Ouafi e Boukachour	INFO R	2020		x		x		x		x		PD P	x				MM, TS
Estehadi, Demir e Huang	COR	2020	x		x					x	x		PD	x			ALNS

Multi-Depot Vehicle Routing Problem (MDVRP)

Wren e Holliday	JOR S	1972		x		x				x		PD	x		x		MM
Polacek, Hatl e Doerner	JH	2004	x		x		x			x		PD	x				VNS
Ho <i>et al.</i>	EAAI	2008		x		x				x		PD			x	x	HGA
Yu, Yang e Xie	JOR S	2011		x		x				x		PD	x				ACO
Salhi, Imran	COR	2014		x		x				x		PD	x		x		MM,

e Wassan													VNS
Zhang <i>et al.</i>	IJIEC	2015	x	x	x			x			PD	x	MM
Li, Li e Pardalos	JCO	2015	x	x	x			x	x		PD		MM, HGA
Chen e Yang	JAT	2017		x	x			x		x	PD	x	MM
Alinaghian e Shokouhi	Ome ga	2018		x		x		x	x	x	PD		MM, HALNS
Stodola	Algori thms	2018		x	x			x			PD	x	ACO
Azadeh e Farrokhi-Asl	TL	2019		x	x			x			PD	x	MIP
Li, Soleimani e Zohal	JCP	2019		x	x			x		x	PD	x	IACO
Shi <i>et al.</i>	AS	2020		x	x			x			CR L		SCO
Stodola	NC	2020		x	x			x			PD	x	HACO
Samsuddin, Othman e Yusuf	-	2020		x	x			x			PD	x	IWD, ACO
Ramos, Gomes e Póvoa		2020		x	x		x	x			PD	x	MILP
Zhen <i>et al.</i>		2020	x	x	x	x		x		x	PD		MIPM, HPSO, HGA
Site-Dependent Vehicle Routing Problem (SDVRP)													
Nag, Golden e Assad	VRM S	1988		x	x	x					PD	x	GAM, O-PC
Chao <i>et al.</i>	SS	1998		x	x	x					PD	x	MM
Chao, Golden e Wasil	INFO R	1999		x	x	x					PD	x	HEUR
Cordeau e	INFO	2001	x	x	x	x					PD	x	TS

Legenda de Revistas:

AS - Applied Sciences
 ASC – Applied Soft Computing
 AOR - Advances in Operations Research
 CIE - Computers e Industrial Engineering
 COR – Computers & Operations Research
 DSL - Decision Science Letters
 EAAI - Engineering Applications of Artificial Intelligence
 EJOR – European Journal of Operational Research
 FEM – Faculty of Economics and Management
 FSMJ – Flexible Services and Manufacturing Journal
 IEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers
 IJIEC - International Journal of Industrial Engineering Computations
 INFOR - Information Systems and Operational Research
 ITOR - International Transactions in Operational Research
 JAT - Journal of Advanced Transportation
 JCAM - Journal of Computational and Applied Mathematics
 JCO - Journal of Combinatorial Optimization
 JCP - Journal of Cleaner Production
 JGO – Journal of Global Optimization
 JH – Journal Heuristics
 JOC – Journal on Computing
 JORS - Journal of the Operational Research Society
 MS – Management Science
 MSRT - Measurement
 NC - Natural Computing
 ORIJ – Operational Research International Journal
 ORS – OR Spectrum
 SS - Springer Science
 TM - Traffic Management
 TL - Transportation Letters
 TRB – Transportation Research Part B
 TRE – Transportation Research Part E
 TRS – Transportation Research Procedia
 TS – Transportation Science
 VRMS - Vehicle routing: Methods and studies
 WM&R - Waste Management & Research

Legenda de Técnicas e Mercadorias:

ACS – Ant Colony System
 AMP – Adaptive Memory Principle
 ALNS – Adaptive Large Neighborhood Search
 AVNS – Adaptive Variable Neighborhood Search
 B&C – Branch and Cut
 BFD – Best Fit Decreasing
 B&P – Branch and Price
 CN – Coleta de Neve
 CG - Column Generation
 CRL – Coleta de Resíduos de Lixo
 CRV – Coleta de Resíduos de Vidro
 GLS - Guided Local Search
 GA – Genetic Algorithm
 GRASP - Greedy Randomized Adaptive Search Procedures
 IP - Integer Programming
 ITS – Iterated Tabu Search
 LNS – Large Neighborhood Search
 LSP - Local Search Procedures
 MA - Memetic Algorithm
 MM – Modelo Matemático
 OQ – Óleo Quente
 PD – Produtos Diversos
 PL – Produtos Lácteos
 PDP – Produtos Derivados do Petróleo
 SAA – Sistema Automatizado de Alocação
 SR – Savings-based Routing
 RS – Resíduos Sólidos
 TS – Tabu Search
 VNS - Variable Neighborhood Search

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este capítulo tem como objetivo apresentar as etapas que foram desenvolvidas neste estudo e a classificação da pesquisa. O objetivo de estudo dessa dissertação é a realização do planejamento de entregas em centros urbanos que possuem restrições para entrada de veículos de grande porte.

A pesquisa é desenvolvida a partir da elaboração de um modelo matemático, para definir as rotas ótimas para atender as demandas dos clientes em centros urbanos, considerando múltiplos armazéns centrais, frota heterogênea com múltiplos compartimentos, reabastecimento intermediário, restrição de acesso, janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário, e alocação unitária das caixas.

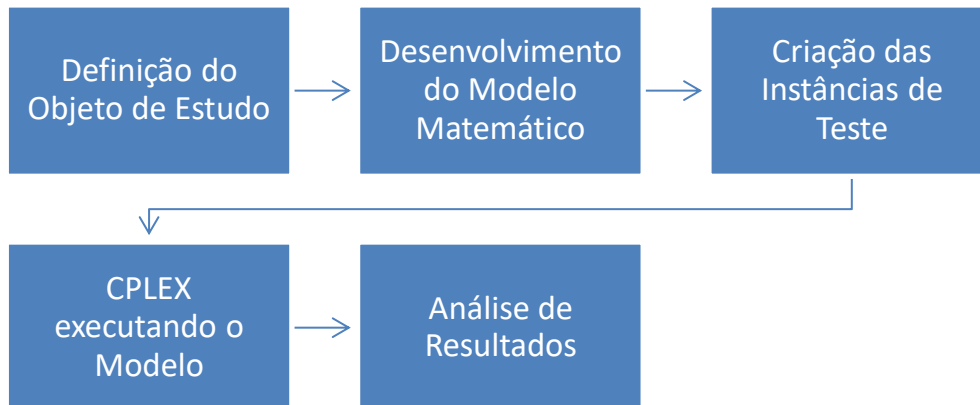
3.1 Etapas Desenvolvidas

O estudo científico foi realizado seguindo 5 etapas distintas e sequenciais, que estão esquematizadas na Figura 6.

3.2 O Problema Analisado

Esta dissertação foi aplicada à cidade de Vitória, capital do Espírito Santo, que possui, segundo o último censo demográfico em 2019, uma população de 362.097 habitantes (IBGE, 2019), no qual vigoram leis que restringem a circulação de caminhões de grande capacidade (AGÊNCIA TRANSPORTA BRASIL, 2014). Uma empresa de entregas urbanas, buscando melhorar a mobilidade em Vitória, está realizando um estudo de viabilidade econômica e operacional no município e deseja utilizar três tipos de veículos, a bicicleta elétrica de carga, vista na Figura 7a, a bicicleta convencional de carga, vista na Figura 7b e a motocicleta convencional de carga, vista na Figura 7c.

Figura 6 - Etapas da metodologia desenvolvida.



Fonte: do Autor.

Figura 7 - Tipos de veículos utilizados na operação.



a: Bicicleta Elétrica de Carga



b: Bicicleta Convencional de Carga



c: Motocicleta Convencional de Carga

Fonte: do Autor.

Estes veículos irão entregar encomendas, a partir de algum armazém central distribuído pela cidade, adquiridas por lojas virtuais e suprimentos para o comércio local e residências. Para facilitar a distribuição em locais mais distantes dos armazéns centrais a frota pode ser reabastecida em pontos estratégicos, denominados nesta dissertação como armazéns intermediários, coletando as encomendas necessárias para atender os clientes da rota. A empresa forneceu os dados aproximados do estudo, após a realização de pesquisas. O tempo médio para entregar um pacote, i. e., o período compreendido entre a chegada do entregador no cliente e de sua saída, é de 5 min e 47s. Os armazéns intermediários são abastecidos durante a noite por caminhões maiores, para que estes estejam operacionais durante o horário comercial, seguindo as rotas calculadas pelo modelo para o dia seguinte.

Para otimizar os cálculos matemáticos, foi considerado a velocidade média de 20,0 km/h e um valor definido para o custo ao utilizar um veículo e o custo do quilometro rodado, sendo R\$ 480,50 e R\$ 1,00 para a bicicleta elétrica, R\$ 168,50 e R\$ 0,40 para a bicicleta convencional, e R\$ 626,00 e R\$ 1,70 para a motocicleta. Foram considerados tamanhos médios de caixas entregues por lojas virtuais, que estão no intervalo entre 0 e 0,15 m³, como também a capacidade dos compartimentos, que são de 0,64 m³ para cada compartimento da bicicleta elétrica, 0,18 m³ para cada compartimento da bicicleta convencional e 0,25 m³ para cada compartimento da motocicleta.

3.3 Elaboração do Modelo Matemático

Após a definição do objeto de estudo, foi realizada uma fundamentação teórica com a intenção de criar um modelo matemático para determinar as rotas de menor custo para atender a todas as demandas dos clientes, considerando múltiplos armazéns centrais, múltiplos compartimentos dos veículos, reabastecimento intermediário, restrição de acesso janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário e alocação unitária das caixas em cada compartimento.

Com base nos estudos teóricos e informações cedidas pela empresa em fase de estudo de viabilidade econômica e operacional para operar no município de Vitória, ES, foi elaborado o modelo matemático de programação linear inteira mista (PLIM)

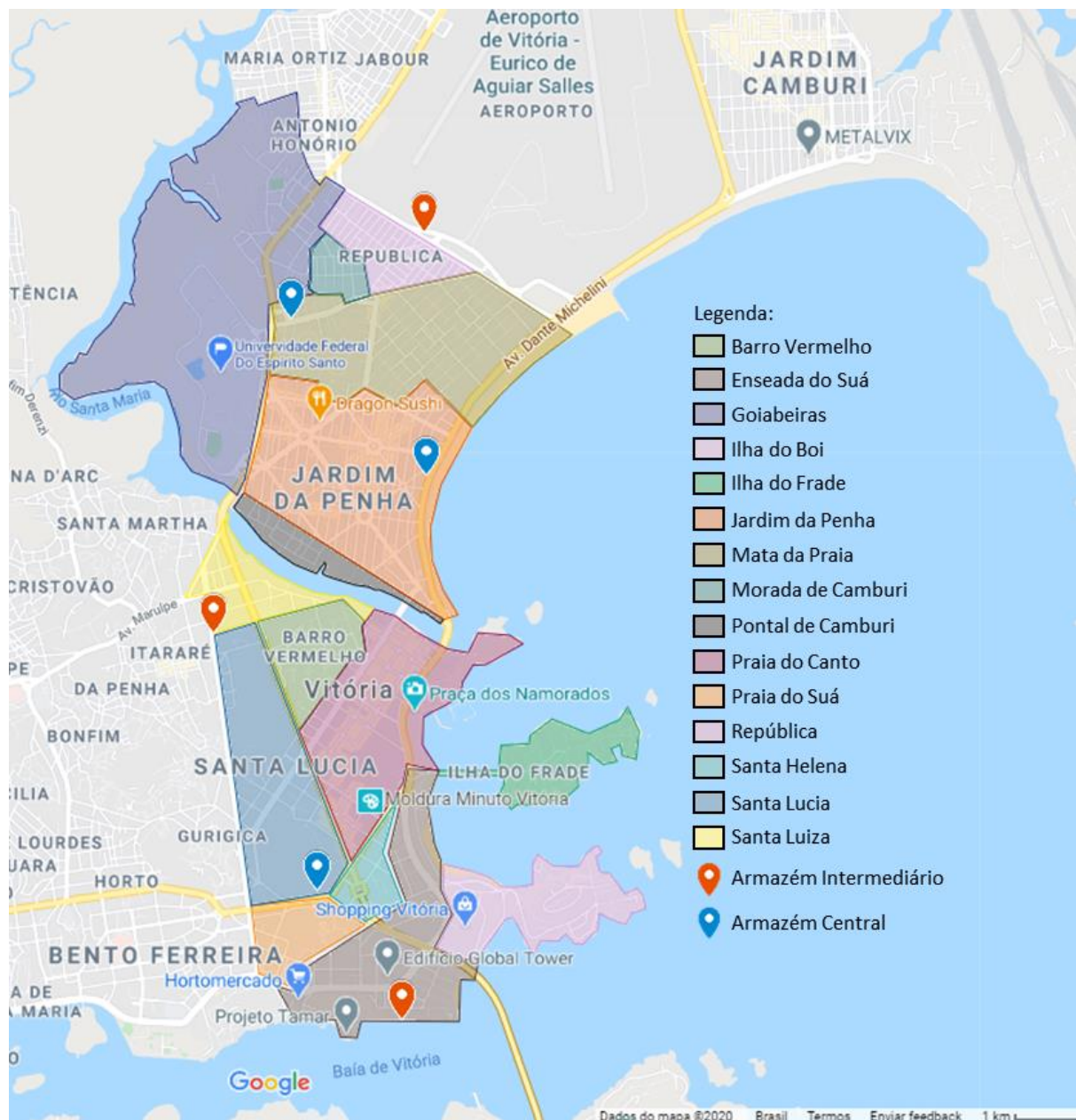
e, então, foi utilizado o solver CPLEX 12.8 para resolver o *Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows*, de modo a fornecer as rotas mais econômicas atendendo às restrições impostas pela operação real e legislação vigente.

3.4 Instâncias de Teste

Foram elaboradas 22 instâncias a fim de testar o modelo matemático proposto. Para sua elaboração foram considerados os pontos planejados pela empresa de transporte para os armazéns intermediários e os armazéns centrais. Os locais dos armazéns centrais foram planejados próximo ao Aeroporto de Vitória, à Terceira Ponte e à Av. Maruípe para facilitar a logística de entrega dos caminhões de maior porte nos dois tipos de armazém. Os armazéns intermediários foram alocados em pontos chave em Vitória para facilitar o reabastecimento dos veículos em rota. Foram estudados os seguintes bairros de Vitória: Barro Vermelho, Enseada do Suá, Goiabeiras, Ilha do Boi, Ilha do Frade, Jardim da Penha, Mata da Praia, Morada de Camburi, Pontal de Camburi, Praia do Canto, Praia do Suá, República, Santa Helena, Santa Lucia e Santa Luiza. A região em estudo pode ser observada na Figura 8.

A Tabela 2 mostra as características de cada instância. A coluna (1) indica o grupo de instâncias que serão testados sob circunstâncias descritas a seguir. A coluna (2) indica o número da instância testada. A coluna (3) representa o número de clientes a serem atendidos. A coluna (4) exibe a quantidade de caixas que devem ser entregues. A coluna (5) indica o número de armazéns intermediários disponíveis para reabastecimento. A coluna (6) representa a quantidade de armazéns centrais disponíveis para iniciar e terminar as rotas. As colunas (7, 9 e 11) exibem as quantidades de bicicletas elétricas, convencionais e motocicletas disponíveis para operação, respectivamente. As colunas (8, 10 e 12) representam a quantidade de compartimentos disponíveis em cada veículo. A coluna (13) indica o tempo de disponibilidade do cliente para receber os veículos. A coluna (14) exibe se foi considerado a restrição de acesso na instância testada. A coluna (15) indica se há variação de compatibilidade de carga no compartimento do veículo.

Figura 8 - Bairros selecionados para o estudo de caso



Fonte: adaptado Google, 2020.

Tabela 2 - Características das Instâncias

G	I	Nº Clientes	Qtd de Caixas	Nº Az Interme diários	Nº Az Centrais	Frota Bic. Elétrica		Frota Bic. Convencional		Frota Motocicleta		Janela de Tempo de Atendimento (h)	Restrição de Acesso	Varia Compat. de Carga no Compartimento
						Qtd.	Qtd. Comp.	Qtd.	Qtd. Comp.	Qtd.	Qtd. Comp.			
1	1	6	20	1	1	1	2	2	1	1	2	8	Sim	Não
	2	8	22											
	3	10	24											
	4	14	28											
2	4	14	28	1	1	1	2	2	1	1	2	8	Sim	Não
	5	14		2										
	6	14		3										
3	7	14	28	1	1	1	1	2	1	1	1	8	Sim	Não
	4	14					2				2			
	8	14					3				3			
	9	14					2				2			
	10	14					3				3			
4	11	14	28	1	1	1	3	2	1	1	3	8	Sim	Não
	4	14					1				2			
	12	14					2				2			
5	13	14	28	1	1	1	3	2	1	1	2	8	Sim	Não
	14	14					1				2			
	4	14					2				2			
6	15	14	28	1	1	1	2	2	1	1	2	8	Sim	Não
	4	14					2				2			
	16	14					2				2			
7	1	6	20	1	1	1	2	2	1	1	2	8	Sim	Não
	17	6	20	1	1	1	2	2	1	1	2	8	Sim	Sim
8	18	15	28	1	1	1	2	2	1	1	2	4	Sim	Não
	19	16												
	20	17												
9	21	20	34	2	1	2	2	2	1	2	2	8	Sim	Não
	22	30	45											

Fonte: do Autor.

O Grupo 1 retrata a situação inicial de atendimento da empresa de transporte. A Instância 1 representa a menor situação, no qual consideram-se 6 clientes a serem atendidos no bairro de Mata da Praia, Morada de Camburi e República com somente um armazém central para início e término das rotas e um armazém intermediário para reabastecer os quatro veículos disponíveis, uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta. A frota obedece ao turno de trabalho dos condutores de 8 horas diárias. O mesmo tempo considerado para janela de tempo no cliente e armazém intermediário. Foram considerados dois compartimentos na bicicleta elétrica, um na bicicleta convencional e dois na motocicleta, para entregar 20 caixas ao todo. As Instâncias 2, 3 e 4 são semelhantes à Instância 1, diferenciando-se no número de clientes, i.e., 8, 10 e 14 clientes, respectivamente, e na quantidade de caixas a distribuir, i.e., 22, 24 e 28 caixas, respectivamente. Em todo o Grupo 1 foi considerado a restrição de acesso nos clientes e que todas as caixas eram compatíveis entre si para acomodação nos compartimentos.

O Grupo 2 representa uma expansão operacional da empresa e é composto pelas Instâncias 5 e 6. Estas instâncias consideram as características e os bairros da Instância 4 acrescentando Jardim da Penha, Pontal de Camburi, Barro Vermelho e Goiabeiras. Tem o propósito de avaliar o impacto que a utilização de 2 e 3 armazéns intermediários, respectivamente, podem trazer nos custos das rotas. Além das Instâncias 5 e 6, considera-se nesta análise a comparação com a Instância 4.

O Grupo 3 é composto pelas Instâncias 7, 8, 9, 10 e 11 que consideram as características da Instância 4. Tem o propósito de testar a influência da alteração no número de compartimentos dos veículos considerados, sendo 1 compartimento para todos os veículos na Instância 7. Na Instância 8 consideram-se 3 compartimentos na bicicleta elétrica e na motocicleta, e 1 compartimento na bicicleta convencional. Na Instância 9 consideram-se 2 compartimentos em todos os tipos de veículos. Na Instância 10 consideram-se 3 compartimentos na bicicleta elétrica e na motocicleta, e 2 compartimentos na bicicleta convencional. Na Instância 11 consideram-se 3 compartimentos em todos os tipos de veículos. Além das Instâncias 7, 8, 9, 10 e 11, observa-se nesta análise a comparação com a Instância 4.

O Grupo 4 é composto pelas Instâncias 12 e 13, e representa uma nova expansão da empresa, que necessita agora de mais armazéns centrais para sua operação. Estas instâncias consideram as características e os bairros da Instância 4 acrescentando os bairros Santa Luiza e Enseada do Suá para realização dos testes. Este grupo tem o objetivo de avaliar o impacto que o acréscimo destes armazéns pode trazer nos custos das rotas. Além das Instâncias 12 e 13, observa-se nesta análise a comparação com a Instância 4.

O Grupo 5 é composto pelas Instâncias 14 e 15 que consideram as características da Instância 4. Tem o propósito de testar a influência da alteração no tempo disponível de recebimento dos veículos pelo cliente e o armazém intermediário, considerando 5 horas para a Instância 14 e 11 horas para a Instância 15. Além das Instâncias 14 e 15, observa-se nesta análise a comparação com a Instância 4.

O Grupo 6 representa a possibilidade de todos os clientes receberem qualquer tipo de veículo da frota e é composto pela Instância 16. A partir das características da Instância 4, a Instância 16 tem o propósito de verificar o impacto nos resultados operacionais com a desativação da restrição de acesso nos clientes. Além da Instância 16, observa-se nesta análise a comparação com a Instância 4.

O Grupo 7 retrata o teste realizado considerando a incompatibilidade de caixas no compartimento. Algumas caixas possuem produtos característicos que os impossibilitam de serem alocados em um mesmo compartimento, como produtos secos e úmidos. Desta forma, faz-se necessário testes para averiguar o impacto nos custos operacionais de limitar o transporte de cargas com características não compatíveis. Para o teste considerou-se a Instância 17, que tem como base a Instância 1 e todas as outras propriedades originais, diferenciando-se apenas com a ativação do controle de compatibilidade de carga.

O Grupo 8 é composto pelas Instâncias 18, 19 e 20 que consideram as características da Instância 4. Tem o propósito de testar se o modelo matemático encontrará solução ótima para 15, 16 e 17 clientes, respectivamente, com uma janela de tempo de 4 horas.

O Grupo 9 retrata a situação com muitos clientes, numa região com alta concentração populacional. Neste caso são considerados todos os bairros da região em estudo, representando a expansão total da empresa. A Instância 21 considera 20 clientes, a utilização de um armazém central e de dois armazéns intermediários, uma frota de seis veículos composta por duas bicicletas elétricas, duas bicicletas convencionais e duas motocicletas. Esta frota deve entregar 34 caixas. As outras definições foram utilizadas da Instância 4. A Instância 22 é semelhante à Instância 21, diferenciando-se somente no número de clientes, 30 clientes, e na quantidade de caixas, 45 caixas.

3.5 Execução do Modelo

Para executar o modelo proposto foi utilizado o *solver* CPLEX, versão 12.8 (IBM, 2019). Foi utilizado um computador Intel Xeon Silver 4116, 2 processadores de 2.10 GHz com 16 núcleos, 128 GB de memória RAM. As instâncias foram executadas por no máximo 24 horas, 86.400 segundos, pois além deste tempo não se observou modificações significativas nos testes.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Considerando o contexto apresentado nos capítulos anteriores, o *Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows* tem o objetivo de reduzir os custos logísticos em centros urbanos com tráfego intenso e legislação que limita a entrada de veículos de grande porte, considerando múltiplos armazéns centrais, alocação unitária das caixas em múltiplos compartimentos, restrição de acesso e janela de tempo de atendimento no cliente e no armazém intermediário, armazéns intermediários para reabastecimento e utilização de veículos de pequeno porte.

Esta proposta de dissertação se difere dos demais artigos e trabalhos publicados por considerar a disponibilidade de múltiplos armazéns centrais para início e término das rotas, sendo que o veículo pode retornar ou não para o mesmo armazém central, a alocação unitária das caixas nos múltiplos compartimentos, para separar eventuais cargas com características especiais, a restrição de acesso e janela de tempo de atendimento no cliente e no armazém intermediário para receber os veículos, como também contempla o reabastecimento de mercadorias em pontos de recarregamento estrategicamente localizados na cidade, chamados de armazéns intermediários, para conseguir atender a todas as demandas dos clientes sem precisar regressar ao armazém central.

Por definição, cada cliente é atendido por somente um veículo que leva todas as caixas demandadas, que podem ser acomodadas nos diferentes compartimentos do veículo. O veículo poderá sair carregado ou não de um armazém central, visando a redução do custo da rota. Caso um armazém intermediário possa ser visitado mais de uma vez por um veículo, deve ser considerado a replicação deste ponto de atendimento quantas vezes forem permitidos nos dados que são executados com o modelo matemático.

A seguir estão os parâmetros iniciais do modelo matemático.

Parâmetros:

nc	Número de clientes a serem atendidos;
nd	Número de armazéns centrais disponíveis;
nf	Número de armazéns intermediários disponíveis;
nv	Número de veículos da frota disponíveis;
np	Número máximo de compartimentos de um veículo da frota;
nx	Número de caixas demandadas pelos clientes;
nw	Número de tipos de veículos disponíveis;

Da frota nv é escolhido um veículo que consegue atender o cliente em sua localização, podendo sair de um armazém central nd vazio e, dessa forma, viajar diretamente para um armazém intermediário nf . Quando no armazém intermediário, o veículo é carregado com mercadorias nx requeridas até o limite de capacidade de armazenamento, sendo que no modelo é permitido somente a alocação unitária das caixas. Em seguida, começa a entregar nos nc clientes, respeitando a janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário. Se for necessário atender a mais clientes que não estão com as mercadorias carregadas, o veículo passa por um armazém intermediário, podendo ser o mesmo armazém ou não, reabastece com as mercadorias necessárias e inicia novamente a entrega nos clientes.

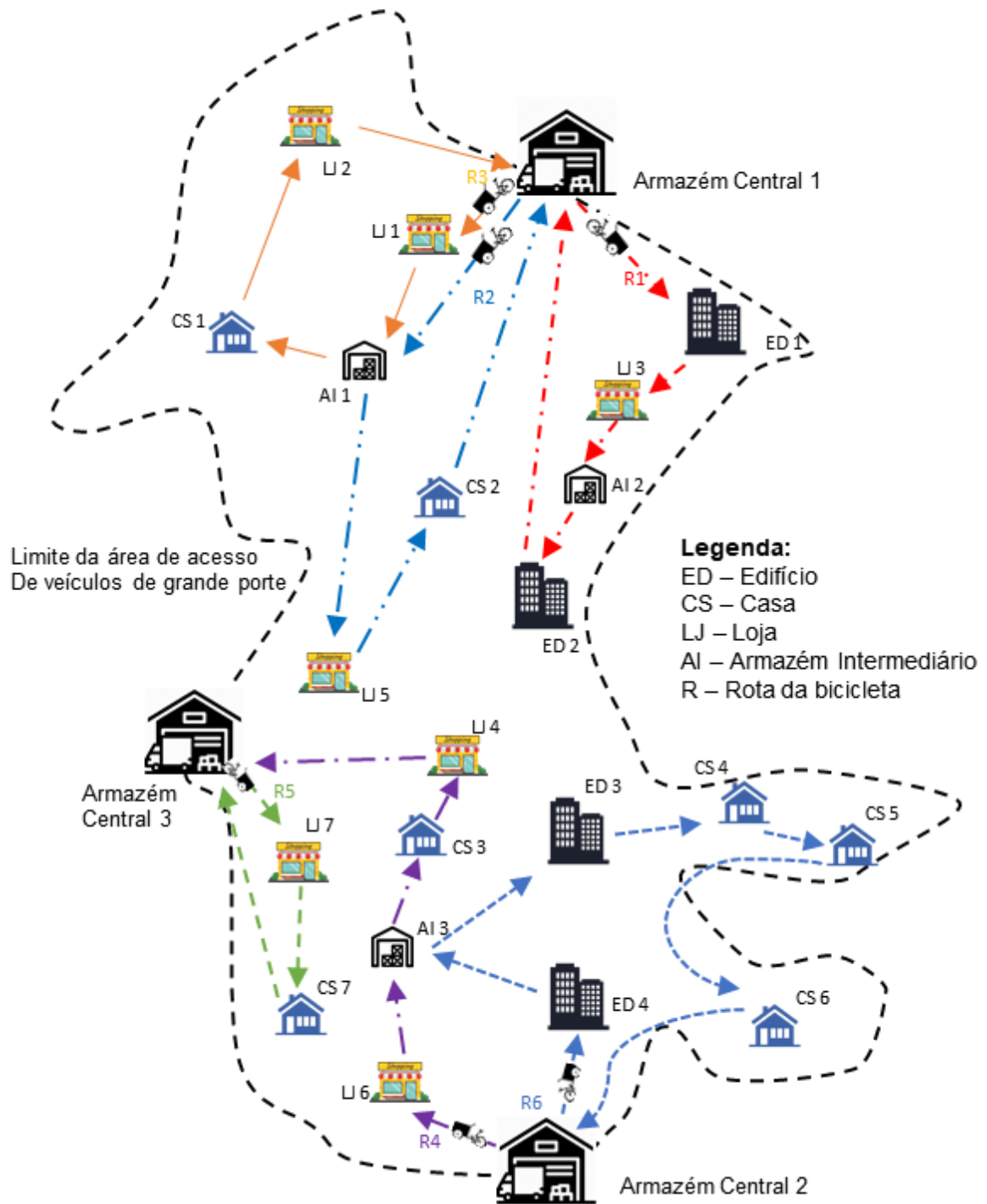
Além dessa possibilidade, o veículo também pode sair carregado de um armazém central e assim inicia imediatamente as entregas aos clientes. Se necessário, o veículo pode ir até um armazém intermediário, recarregar com as mercadorias requeridas por outros clientes e começar a atendê-los novamente. Após atender a todos os clientes e não possuir nenhuma mercadoria em seus compartimentos, o veículo retorna ao armazém central de origem ou outro que for mais viável financeiramente.

A Figura 9 mostra as rotas de seis veículos onde, na rota R1, sai carregado com algumas mercadorias e, em seguida, inicia a entrega no edifício ED 1 e na loja LJ 3.

Para atender os outros clientes, o veículo vai para o armazém intermediário AI 2. Nele o veículo recarrega com as mercadorias para entregar no edifício ED 2 e retorna, ao final da rota, vazio para o mesmo armazém central inicial. O veículo na rota R2 sai vazio do armazém central e vai para o armazém intermediário AI 1. Nele o veículo carrega com as mercadorias para entregar na loja LJ 5 e casa CS 2. Após realizar todas as entregas, o veículo retorna vazio ao mesmo armazém central do início da rota. Já na rota R3 o veículo sai carregado com algumas mercadorias e inicia a entrega na loja LJ 1. Para atender os outros clientes, o veículo vai para o armazém intermediário AI 1. Nele o veículo recarrega com as mercadorias para entregar na casa CS 1 e na loja LJ 2. Ao final da rota, o veículo retorna ao mesmo armazém central inicial com seus compartimentos vazios.

Na rota R4 o veículo sai com algumas mercadorias e inicia a entrega na loja LJ 6 e, em seguida, vai para o armazém intermediário AI 3. Nele o veículo recarrega com as mercadorias para entregar na casa CS3 e na loja LJ 4, e finaliza a rota com seus compartimentos vazios em um armazém central diferente do início da rota. O veículo na rota R5 sai com todas as mercadorias para realizar as entregas na loja LJ 7 e na casa CS 7, não passa por nenhum armazém intermediário e, ao final da rota, retorna ao mesmo armazém central inicial com seus compartimentos vazios. Na Rota R6 o veículo sai com algumas mercadorias para realizar a entrega no edifício ED 4 e, em seguida, vai para o armazém intermediário AI 3. Nele o veículo recarrega com as mercadorias para entregar no edifício ED 3, nas casas CS 4, CS 5 e CS 6. Após realizar todas as entregas, o veículo retorna vazio ao mesmo armazém central do início da rota.

Figura 9 – Esquema das rotas realizadas pelos veículos



Fonte: do Autor.

Após as explicações anteriores, são apresentados a seguir os conjuntos, os parâmetros restantes, variáveis de decisão, função objetivo e restrições do modelo matemático proposto.

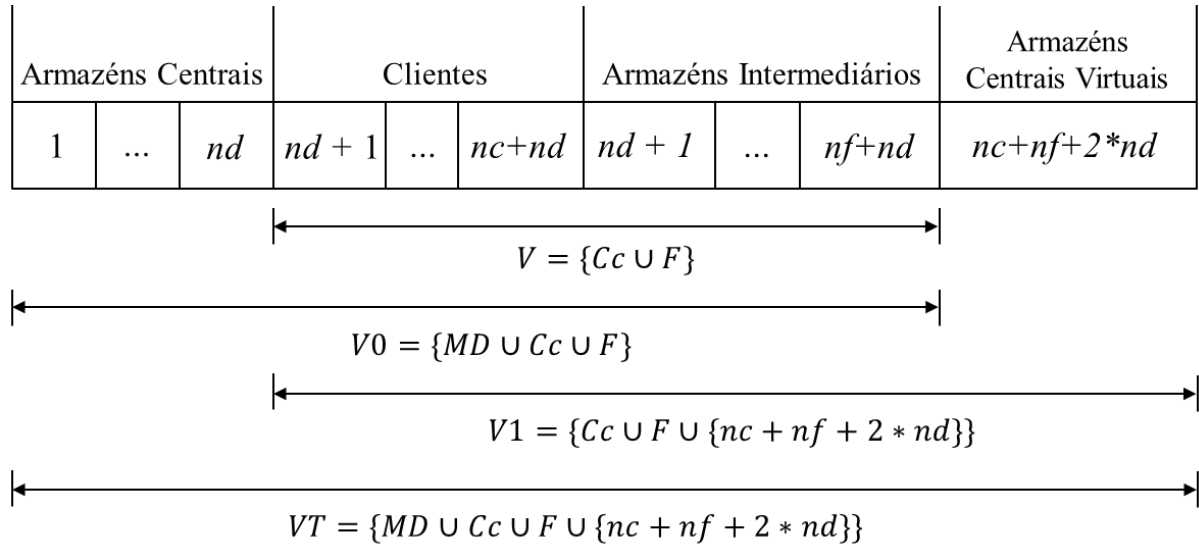
Conjuntos:

Cc	Conjunto de clientes, variando de $nd + 1$ a $nc + nd$;
MD	Conjunto de armazéns centrais, variando de 1 a nd ;
V	Conjunto de nós i , variando de $nd + 1$ a $nc + nf + nd$;
$V0$	Conjunto auxiliar que acrescenta os armazéns centrais ao conjunto V , variando de 1 a $nc + nf + nd$;
$V1$	Conjunto auxiliar que acrescenta os armazéns centrais virtuais ao conjunto V , variando de $nd + 1$ a $nc + nf + 2 * nd$;
VT	Conjunto auxiliar que acrescenta os armazéns centrais iniciais e os virtuais, variando de 1 a $nc + nf + 2 * nd$;
F	Conjunto de armazéns intermediários, variando de $nd + 1$ a $nf + nd$;
VD	Conjunto de tipos de veículos disponíveis, variando de 1 a nw ;
K	Conjunto de veículos disponíveis, variando de 1 a nv ;
Cp	Conjunto de compartimentos disponíveis, variando de 1 a np ;
C	Conjunto de caixas a serem entregues, variando de 1 a nx ;

Os conjuntos relacionados a clientes e armazéns intermediários podem ser observados na Figura 10, Figura 11a e Figura 11b. O conjunto V é formado pelos clientes e os armazéns intermediários. O conjunto $V0$ é similar ao conjunto V acrescentando somente os armazéns centrais. O conjunto $V1$ é similar ao conjunto V acrescentando somente os armazéns centrais virtuais. O conjunto VT é a junção de todos os conjuntos, ou seja, é formado pelos armazéns centrais, seguido pelos clientes, armazéns intermediários e, finalmente, os armazéns centrais virtuais. Vale

ressaltar que os armazéns centrais de origem e os virtuais são os mesmos armazéns, mas são representados como nós distintos no modelo matemático.

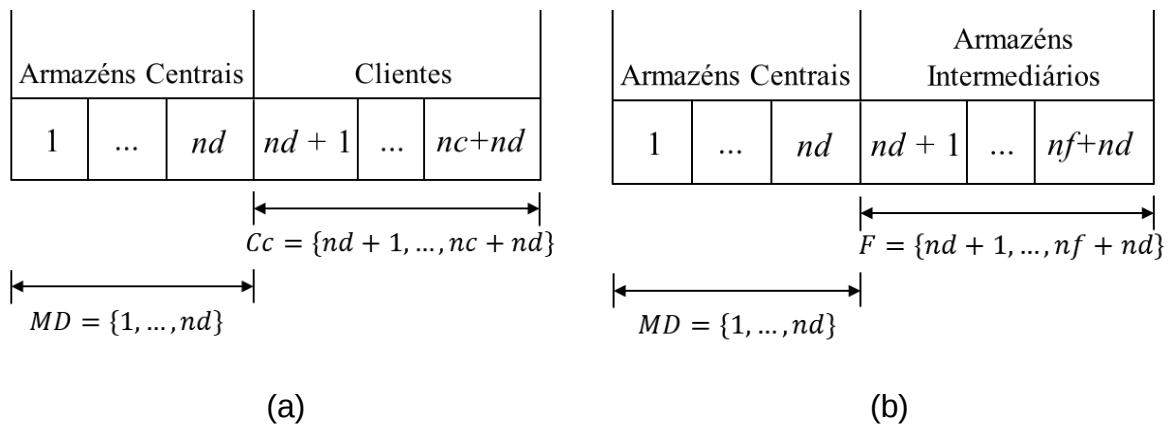
Figura 10 - Ilustração dos conjuntos de clientes e armazéns intermediários



Fonte: do Autor.

O conjunto MD é composto pelos armazéns centrais e Cc considera os clientes, assim como, o conjunto F é formado pelos armazéns intermediários.

Figura 11 - Conjuntos (a) MD e Cc ; (b) MD e F do modelo matemático proposto



Fonte: do Autor.

Parâmetros:

vlb_c	Volume da caixa $c \in C$;
$vlc_{k,p}$	Volume do compartimento $p \in Cp$ do veículo $k \in K$;
$pr_{i,c}$	Caixa $c \in C$ do cliente $i \in V$;
ck_k	Custo ao utilizar o veículo $k \in K$;
cd_k	Custo por quilômetro rodado do veículo $k \in K$;
ot	Tempo médio de operação de carregamento e descarregamento de uma caixa;
$di_{i,j}$	Distância entre os nós $i \in VT$ e $j \in VT$;
$t_{i,j}$	Tempo de viagem entre os nós $i \in VT$ e $j \in VT$;
wti_i	Início da janela de tempo no cliente e armazém intermediário $i \in VT$;
wtf_i	Fim da janela de tempo do cliente e armazém intermediário $i \in VT$;
vt_k	Tipo de veículo da frota $k \in K$;
$vtc_{i,v}$	Tipo de veículo $v \in VD$ aceito pelo cliente $i \in C$;
$mc_{u,\alpha}$	Compatibilidade de uma caixa $u \in C$ e $\alpha \in C$;
ψ	Parâmetro multiplicado à primeira parcela da função objetivo que visa dar peso ao custo do quilômetro rodado do veículo ao percorrer a distância entre dois nós distintos, foi adotado o valor 10;
φ	Parâmetro multiplicado à segunda parcela da função objetivo que visa dar maior peso ao custo de utilização do veículo, foi adotado o valor de 100;
M	Número arbitrário muito grande, foi adotado o valor 99999.
m	Número arbitrário muito pequeno, foi adotado o valor 0,0001.

Variáveis de decisão:

$x_{i,j,k}$	Variável binária que assume o valor 1 caso o veículo $k \in K$ percorra o arco $(i,j) \in VT$, caso contrário assume o valor 0;
$te_{i,k}$	Indica o tempo de chegada do veículo $k \in K$ no nó $i \in VT$;
$s_{c,p,k}$	Variável binária que assume o valor 1 caso a caixa $c \in C$ esteja dentro do compartimento $p \in Cp$ do veículo $k \in K$, caso contrário assume o valor 0;
$z_{i,k}$	Variável binária que assume valor 1 se o cliente $i \in Cc$ está sendo atendido pelo veículo $k \in K$, caso contrário assume o valor 0;
$l_{i,k,p,c}$	Indica a quantidade de caixas $c \in C$ no veículo $k \in K$, no compartimento $p \in Cp$, que está chegando no nó $i \in VT$.

A seguir são apresentadas a função objetivo e as restrições. As restrições do modelo matemático proposto podem ser analisadas em quatro partes. A primeira parte, restrições (1) a (8), trata da função objetivo e das condições primárias do CVRP. A segunda parte, restrições (9) a (14), trata dos múltiplos compartimentos. A terceira parte trata do tempo total da operação e janela de tempo, restrições (15) a (21). A quarta parte, restrições (22) a (29), trata do recarregamento intermediário. A quinta e última parte, restrições (30) e (31), trata da restrição de acesso e compatibilidade de carga, respectivamente. A seguir são apresentadas a função objetivo e as restrições.

Função Objetivo

$$\text{Minimizar } \psi \sum_{i \in VT} \sum_{j \in VT | i \neq j} \sum_{k \in K} cd_k di_{i,j} x_{i,j,k} + \varphi \sum_{k \in K} \sum_{j \in V} \sum_{h \in MD} ck_k x_{h,j,k} + \sum_{i \in MD} \sum_{k \in K} te_{i,k} \quad (1)$$

Sujeito a:

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

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

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

$$\sum_{i \in V0 | i \neq \gamma} x_{i,\gamma,k} - \sum_{j \in V1 | j \neq \gamma} x_{\gamma,j,k} = 0 \quad \forall \gamma \in V, k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V0} \sum_{\mu \in MD} x_{i,(nd+nc+nf+\mu),k} = 1 \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in VT} \sum_{\mu \in MD} x_{(nd+nc+nf+\mu),j,k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{i \in VT} \sum_{\mu \in MD} x_{i,\mu,k} = 0 \quad \forall k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V1} \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} x_{i,j,k} = \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} z_{i,k} \quad \forall i \in Cc, k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{p \in CP} \sum_{k \in K} s_{c,p,k} = 1 \quad \forall c \in C \quad (10)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{p \in CP} s_{c,p,k} \leq M \sum_{h \in MD} \sum_{j \in V} x_{h,j,k} \quad \forall k \in K \quad (11)$$

$$m \geq \sum_{p \in CP} \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} s_{c,p,k} - M z_{i,k} \quad \forall i \in Cc, k \in K \quad (12)$$

$$m \leq \sum_{p \in CP} \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} s_{c,p,k} + M (1 - z_{i,k}) \quad \forall i \in Cc, k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{p \in CP} \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} s_{c,p,k} = z_{i,k} \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} pr_{i,c} \quad \forall i \in Cc, k \in K \quad (14)$$

$$te_{j,k} \geq te_{i,k} + t_{i,j} x_{i,j,k} - M (1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \\ | i \neq j, i \leq nd \quad (15)$$

$$te_{j,k} \geq te_{i,k} + ot \sum_{c \in C | pr_{i,c}=1} pr_{i,c} + t_{i,j} x_{i,j,k} \quad \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \\ | i \neq j, i \geq nd + 1 \cap \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
& -M(1 - x_{i,j,k}) & i \leq nc + nd \\
& te_{j,k} \geq te_{i,k} + \left(ot \sum_{c \in C} \sum_{p \in Cp} (l_{j,k,p,c} - l_{i,k,p,c}) \right) + & \forall i \in V0, j \in V1, k \in K \\
& & | i \neq j, i \leq nd, \\
& t_{i,j} x_{i,j,k} - M(1 - x_{i,j,k}) & i \geq nd + nc + 1 \cap \\
& & i \leq nc + nf + nd
\end{aligned} \tag{17}$$

$$te_{i,k} \geq wti_i \sum_{j \in V1} x_{i,j,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \tag{18}$$

$$te_{i,k} \leq wtf_i \sum_{j \in V1} x_{i,j,k} \quad \forall i \in V0, k \in K \tag{19}$$

$$\begin{aligned}
& te_{(nd+nc+nf+\mu),k} \geq wti_{(nd+nc+nf+\mu)} \\
& \sum_{i \in V0} x_{i,(nd+nc+nf+\mu),k} & \forall k \in K, \mu \in MD
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
& te_{(nd+nc+nf+\mu),k} \leq wtf_{(nd+nc+nf+\mu)} \\
& \sum_{i \in V0} x_{i,(nd+nc+nf+\mu),k} & \forall k \in K, \mu \in MD
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
& l_{j,k,p,c} \leq l_{i,k,p,c} + M(1 - x_{i,j,k}) & \forall i \in VT, j \in V1, \\
& & k \in K, p \in Cp, c \in C \\
& & | i \leq nd
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
& l_{j,k,p,c} \geq l_{i,k,p,c} - M(1 - x_{i,j,k}) & \forall i \in VT, j \in V1, \\
& & k \in K, p \in Cp, c \in C \\
& & | i \leq nd
\end{aligned} \tag{23}$$

$$\begin{aligned}
& l_{j,k,p,c} \leq l_{i,k,p,c} - pr_{i,c} s_{c,p,k} + M(1 - x_{i,j,k}) & \forall i \in VT, j \in V1, k \in K, \\
& & p \in Cp, c \in C | \\
& & i \geq nd + 1 \cap i \leq nd + nc \cap \\
& & i \neq j
\end{aligned} \tag{24}$$

$$l_{j,k,p,c} \geq l_{i,k,p,c} - pr_{i,c} s_{c,p,k} - M(1 - x_{i,j,k}) \quad \forall i \in VT, j \in V1, k \in K, \tag{25}$$

$$l_{j,k,p,c} \leq l_{i,k,p,c} + pr_{j,c} s_{c,p,k} \\ + M (1 - x_{i,j,k})$$

$$l_{j,k,p,c} \geq l_{i,k,p,c} + pr_{j,c} s_{c,p,k} \\ - M (1 - x_{i,j,k})$$

$$\sum_{c \in C} l_{i,k,p,c} vlb_c \leq vlc_{k,p} \sum_{j \in V1} x_{i,j,k}$$

$$l_{(nc+nf+nd+\mu),k,p,c} = 0$$

$$\sum_{j \in VT} x_{i,j,k} = 0$$

$$s_{u,p,k} + s_{\alpha,p,k} \leq 1$$

$$\sum_{h \in MD} \sum_{j \in V1} \sum_{k \in K} x_{h,j,k} \geq 1$$

$$\sum_{h \in MD} \sum_{j \in V1} \sum_{k \in K} x_{h,j,k} \leq nv$$

$$p \in Cp, c \in C |$$

$$i \geq nd + 1 \cap i \leq nd + nc \cap$$

$$i \neq j$$

$$\forall i \in VT, j \in V1, k \in K,$$

$$p \in Cp, c \in C |$$

$$i \geq nd + nc + 1 \cap \quad (26)$$

$$i \leq nd + nc + nf \cap$$

$$j \leq nd + nc + nf \cap i \neq j$$

$$\forall i \in VT, j \in V1, k \in K,$$

$$p \in Cp, c \in C |$$

$$i \geq nd + nc + 1 \cap \quad (27)$$

$$i \leq nd + nc + nf \cap$$

$$j \leq nd + nc + nf \cap i \neq j$$

$$\forall i \in VT, k \in K, p \in Cp \quad (28)$$

$$\forall k \in K, p \in Cp, c \in C, \quad (29)$$

$$\mu \in MD$$

$$\forall i \in Cc, k \in K | \quad (30)$$

$$vtc_{i,vt_k} = 0$$

$$\forall u \in C, \alpha \in C, p \in Cp, k \in K | \quad (31)$$

$$u \neq \alpha, mc_{u,\alpha} = 0$$

$$\quad (32)$$

$$\quad (33)$$

$$x_{i,i,k} = 0 \quad \forall i \in VT, k \in K \quad (34)$$

$$x_{i,j,k} \in \{0,1\} \quad \forall i \in VT, j \in VT, k \in K \quad (35)$$

$$z_{i,k} \in \{0,1\} \quad \forall i \in Cc, k \in K \quad (36)$$

$$s_{c,p,k} \in \{0,1\} \quad \forall c \in C, p \in Cp, k \in K \quad (37)$$

$$l_{j,k,p,c} \in \{0,1\} \quad \forall j \in VT, k \in K, p \in Cp, \\ c \in C \quad (38)$$

$$te_{i,k} \in \mathbb{R}^+ \quad \forall i \in VT, k \in K \quad (39)$$

A Função Objetivo, Equação (1), foi dividida em três partes. A primeira representa a soma do custo do quilômetro rodado de um veículo para percorrer a distância entre dois nós distintos. A segunda parcela representa o custo total de utilização de cada veículo. Essas duas parcelas representam o custo total da logística para o atendimento das demandas dos clientes nos centros urbanos. A terceira parte representa o tempo total de viagem. A função objetivo deve ser minimizada.

As restrições (2) certificam que cada cliente seja visitado uma única vez. Já as restrições (3) asseguram que cada armazém intermediário seja visitado no máximo uma vez por um veículo. As restrições (4) garantem que cada veículo realize somente uma viagem. As restrições (5) asseguram as restrições de fluxo do problema de roteamento. As restrições (6) certificam que o veículo saia de algum armazém central inicial e termine sua rota em algum armazém central virtual. As restrições (7) asseguram que nenhum veículo saia de algum armazém central virtual. As restrições (8) impossibilitam que os veículos retornem para algum armazém central inicial. As restrições (9) definem que o veículo só pode passar por um cliente se tiver com suas mercadorias dentro do veículo. As restrições (10) asseguram que uma caixa estará apenas em um compartimento de um veículo. As restrições (11) garantem que um compartimento será considerado utilizado se uma caixa é alocada no mesmo. As restrições (12), (13) e (14) asseguram que o cliente tenha pelo menos uma caixa no veículo que o atende.

As restrições (15) garantem que o tempo total de chegada de um veículo seja o tempo de deslocamento deste veículo entre os nós, considerando a saída de um armazém central e indo em direção a um cliente ou armazém intermediário. As restrições (16) definem que o tempo total de chegada de um veículo seja o tempo de deslocamento entre os nós, acrescido do tempo de operação para descarregar as caixas do cliente inicial, considerando a saída de um cliente ou um armazém central e indo em direção a um novo cliente ou armazém intermediário. As restrições (17) asseguram que o tempo total de chegada de um veículo seja o tempo de deslocamento entre estes nós, acrescido do tempo de operação para carregar as caixas do armazém intermediário inicial, considerando a saída de um armazém intermediário e indo em direção a um cliente ou um novo armazém intermediário. As restrições (18) e (19) asseguram que o tempo total em um cliente ou armazém intermediário deve obedecer a janela de tempo de operação do nó visitado. As restrições (20) e (21) asseguram que o tempo de chegada em um armazém central virtual deve obedecer a janela de tempo definida para esse.

As restrições (22) a (25) garantem o descarregamento nos clientes. As restrições (22) e (23) definem que o total carregado em um veículo saindo de algum armazém central inicial e indo em direção a outro nó diferente dele é igual ao total que o veículo carregou no armazém central inicial. As restrições (24) e (25) definem que o total que está carregado em um veículo saindo de um cliente para outro nó diferente dele é calculado como o total de caixas com que o veículo chegou no próximo cliente menos o total entregue no cliente anterior. As restrições (26) e (27) asseguram o carregamento em armazéns intermediários, no qual definem que o total que está carregado em um veículo saindo de um armazém intermediário para outro nó diferente dele é calculado como o total de caixas com o que o veículo chegou no armazém intermediário mais o total carregado no mesmo. As restrições (28) garantem que o volume das caixas não exceda o volume dos compartimentos que estão alocados. As restrições (29) asseguram que o veículo chegue ao final da rota, ou seja, retorne a algum armazém central virtual sem carga.

As restrições (30) definem que o veículo só pode atender ao cliente se o tipo do veículo for compatível com o tipo que o cliente pode receber. As restrições (31) garantem que duas caixas distintas só poderão ir juntas no mesmo compartimento

se forem compatíveis entre si. As restrições (32) e (33) limitam o uso dos veículos à frota disponível. Como $j \in V1$ tem-se $x_{h,j,k} \geq 1$, porque pelo menos um veículo deve ser utilizado na frota, pois não há solução no problema de roteamento de veículos se pelo menos um veículo não for utilizado. Além disso, o máximo de veículos que pode ser utilizado é o número de veículos disponíveis, nv . As restrições (34) garantem que um veículo não vá de um nó para o mesmo nó. As restrições (35) a (39) definem o domínio das variáveis.

O modelo matemático possui as variáveis de decisão inteiras apresentadas na Equação 40 e as variáveis de decisão reais na Equação 41.

$$|K| (|VT|^2 + |VT||Cp||C| + |Cc| + |C||Cp|) \quad (40)$$

$$|VT||K| \quad (41)$$

5 RESULTADOS E ANÁLISES

Esse capítulo tem por finalidade apresentar os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático descrito no Capítulo 4 para as Instâncias de teste propostas.

Para resolver o modelo matemático proposto, foi utilizado o *solver* IBM ILOG CPLEX Versão 12.8 (IBM, 2019) em um computador com 2 processadores Intel Xeon Silver 4116 de 2.10 GHz com 16 núcleos cada e 128 GB de memória RAM e em outro computador com processador Intel Xeon E5 de 2.30 GHz com 8 núcleos cada e 64 GB de memória RAM. As instâncias foram executadas por no máximo 24 horas, 86.400 segundos. Após este tempo percebeu-se que não houve modificações significativas nos testes, portanto, 24 horas foram suficientes para chegar aos resultados apresentados, reduzindo o custo computacional.

Os resultados obtidos com as instâncias de teste utilizando o CPLEX são apresentados na Tabela 3. A primeira e a segunda colunas, G e I representam respectivamente os grupos e as instâncias testadas. A terceira coluna, FO, representa o valor obtido na Função Objetivo. A quarta, quinta e sexta colunas, UB, LB e *Gap*, representam respectivamente o *Upper Bound*, o *Lower Bound* e o *Gap* obtido pelo CPLEX, $Gap = \left(\frac{UB-LB}{UB} \right) * 100$. A sétima coluna, TE, representa o tempo de execução do CPLEX.

Tabela 3 – Resultados Encontrados pelo CPLEX

G	I	FO	UB	LB	Gap (%)	TE (s)
1	1	64.919,78	64.919,78	64.919,78	0,00%	10,84
	2	64.923,02	64.923,02	64.923,02	0,00%	28,61
	3	64.936,41	64.936,41	64.936,41	0,00%	98,67
	4	64.996,78	64.996,78	64.974,20	0,03%	86.400,00
2	5	64.964,54	64.964,54	64.964,54	0,00%	21.315,37
	6	64.934,55	64.934,55	64.934,55	0,00%	32.864,25
3	7	79.569,99	79.569,99	79.569,99	0,00%	1.312,83
	8	65.002,73	65.002,73	64.971,21	0,05%	86.400,00
	9	65.015,84	65.015,84	64.972,46	0,07%	86.400,00
	10	65.019,10	65.019,10	64.976,75	0,07%	86.400,00
	11	65.054,51	65.054,51	64.981,81	0,11%	86.400,00
4	12	64.991,79	64.991,79	64.964,70	0,04%	86.400,00
	13	64.982,32	64.982,32	64.956,55	0,04%	86.400,00
5	14	65.040,70	65.040,70	64.973,53	0,10%	86.400,00
	15	65.001,94	65.001,94	64.973,97	0,04%	86.400,00
6	16	81.735,42	81.735,42	16.837,52	79,40%	86.400,00
7	1	64.919,78	64.919,78	64.919,78	0,00%	10,84
	17	64.931,43	64.931,43	64.931,43	0,00%	58,44
8	18	-	-	64.946,17	-	86.400,00
	19	-	-	64.948,78	-	86.400,00
	20	-	-	64.949,63	-	86.400,00
9	21	-	-	64.983,59	-	86.400,00
	22	-	-	65.035,38	-	86.400,00

Fonte: do Autor.

A partir deste ponto serão apresentados uma análise de desempenho do CPLEX e uma análise operacional dos resultados alcançados pelo solver.

5.1 Análise de Desempenho do CLPEX

O CPLEX encontrou a solução ótima para as Instâncias 1, 2, 3, 5, 6, 7 e 17. Para as Instâncias 4, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16 o *solver* encontrou solução, porém não é a solução ótima. Destaca-se que a exceção da Instancia 16, os testes apresentaram um *gap* pequeno, apesar do alto tempo de execução. A Instância 16, por sua vez, pertencente ao Grupo 6, tinha o objetivo de testar a capacidade do modelo ser resolvido de forma ótima sem considerar a restrição de acesso. Em

todas as outras instâncias essa característica foi considerada, tendo, portanto, ocorrido uma redução do espaço solução. Sem esta condição o espaço solução é maior, dificultando o CPLEX encontrar a solução ótima. Mesmo sem essa característica a Instância 16 encontrou solução, porém com *gap* igual a 79,40%. Nas Instâncias 18, 19, 20, 21 e 22, o CPLEX não encontrou nenhuma solução factível após 24 horas executando o modelo matemático, encontrando apenas um LB.

Nota-se nas instâncias do Grupo 2 um tempo de execução um pouco mais elevado que as instâncias do Grupo 1, devido às instâncias terem mais armazéns intermediários a disposição e um número maior de clientes para atender, aumentando assim as possibilidades de rotas que os veículos poderiam realizar. Já na Instância 17 percebe-se um tempo de execução reduzido, devido a sua base ser a Instância 1 que considerou seis clientes e 20 caixas para entrega.

Em relação às Instâncias 8, 9, 10 e 11, Grupo 3, é possível conferir que o CPLEX não provou ter encontrado a solução ótima, com *gap* igual a 0,05%, 0,07%, 0,07% e 0,11%, respectivamente, demonstrando que ainda poderiam ser encontradas soluções melhores do que as encontradas atualmente. O mesmo ocorreu com as Instâncias 12, 13, 14 e 15, Grupos 4 e 5, respectivamente. Esses *gaps* podem ter ocorrido devido ao aumento do número de variáveis, gerando uma maior quantidade de combinações possíveis entre essas ela, dificultando a execução do modelo. As demais instâncias serão analisadas no subcapítulo 5.2.

5.2 Análise Operacional dos Resultados

Apesar de 10 das 17 instâncias com solução factível terem apresentado *gap*, optou-se por comparar os resultados operacionais alcançados pelo CPLEX, pois os *gaps* são relativamente pequenos em quase todas as instâncias. É importante ressaltar que as instâncias, em sua maioria, utilizaram os mesmos tipos de veículos, repetindo também a quantidade, sendo o fator principal para a proximidade nos valores da Função Objetivo. A diferença dos resultados se dá principalmente pela parcela da FO que envolve o custo do quilômetro rodado pelo veículo.

A Tabela 4 apresenta as análises mais relevantes dos resultados operacionais, o custo de utilização, Coluna 3, quilômetro rodado, Coluna 4, a quantidade de veículos utilizados de cada tipo, Colunas 5 a 7, e a quantidade total de compartimentos utilizados, respectivamente, dos Grupos 2, 3, 4, 5 e 6. A última coluna representa a soma de todos os compartimentos utilizados para a frota considerada no teste. Para a apresentação do custo de transporte real, foram retirados os parâmetros multiplicados nas parcelas do Custo de Utilização e do Custo do KM na Função Objetivo.

Tabela 4 - Análises dos Resultados Operacionais

G	I	Custo de Transporte Real		Qtd. Veículos Utilizados			Qtd. Total Compartimentos Utilizados
		Utilização (R\$)	KM (R\$)	Elétrica	Convencional	Motocicleta	
2	5	649,00	5,71	1	1	0	3
	6	649,00	3,17	1	1	0	
3	7	794,50	10,41	0	1	1	2
	8	649,00	9,01	1	1	0	4
	9	649,00	10,27	1	1	0	4
	10	649,00	10,62	1	1	0	5
	11	649,00	13,87	1	1	0	6
4	12	649,00	8,10	1	1	0	3
	13	649,00	7,35	1	1	0	
5	14	649,00	12,27	1	1	0	3
	15	649,00	9,08	1	1	0	
6	16	816,00	11,32	1	2	0	4

Fonte: do Autor.

Nos próximos parágrafos serão apresentadas as rotas encontradas dos veículos que foram necessários para atender às entregas aos clientes de cada grupo de instância proposto com o intuito de comparar os resultados e a qualidade das soluções encontradas pelo CPLEX. Portanto, a letra “D” indica o Armazém Central de onde os veículos iniciam e terminam sua rota, a letra “C” indica o cliente que receberá a(s) caixa(s), as letras “AI” indicam o Armazém Intermediário onde o veículo coleta as caixas para continuar a sua rota e as letras “Cp” indica em qual compartimento a

caixa foi transportada. É importante ressaltar que não será tratado a arrumação de caixas dentro do compartimento nesta dissertação, sendo que a organização apresentada nas tabelas a seguir apresenta as caixas que estão em cada compartimento do veículo.

Os números abaixo de “Cp” representam as caixas que estão chegando no determinando ponto, no respectivo compartimento e veículo. O hífen representa que a caixa não está no ponto atual, indicando que foi entregue no ponto anterior. Ao passar por um armazém intermediário, o próximo ponto mostra as caixas coletadas e as que porventura também estavam no compartimento reordenadas e em ordem crescente.

Na Tabela 5 e Tabela 6 são apresentadas as rotas encontradas para o Grupo 2, que contempla as Instâncias 5 e 6, respectivamente. Neste grupo foi definido a disponibilidade de dois armazéns intermediários para a Instância 5 e três para a Instância 6, um armazém central, frota composta por uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta para entrega de 28 caixas com um tempo de atendimento de oito horas. Tanto na Instância 5 e como na Instância 6 foram utilizadas uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional.

Tabela 5 - Rotas da Instância 5

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																	
		D		C13		C12		C5		C2		D							
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2						
		3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	-	-						
		8	11	8	11	8	11	8	11	8	-	-	-						
		9	17	9	17	9	17	9	17	-	-	-	-						
		14	20	14	20	14	20	14	20	14	20	-	-						
			26		26		26		-		-		-						
			27		27		-		-		-		-						
3	Bicicleta Convencional	D	C8	C14	C10	AI2	C4	C9	AI2	C6	AI2	C1	AI1	C3	AI1	C7	A1	C11	D
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		22	22	-	-	-	4	-	-	5	-	1	-	12	-	21	-	28	-
		23	23	23	23	-	10	-	-	6	-	7	-	15	-				
		24	24	24	24	24	16	-	-			13	-						
		25	25	25	-	-	18	-	-			19	-						
							24	24	-										

Fonte: do Autor.

Tabela 6 - Rotas da Instância 6

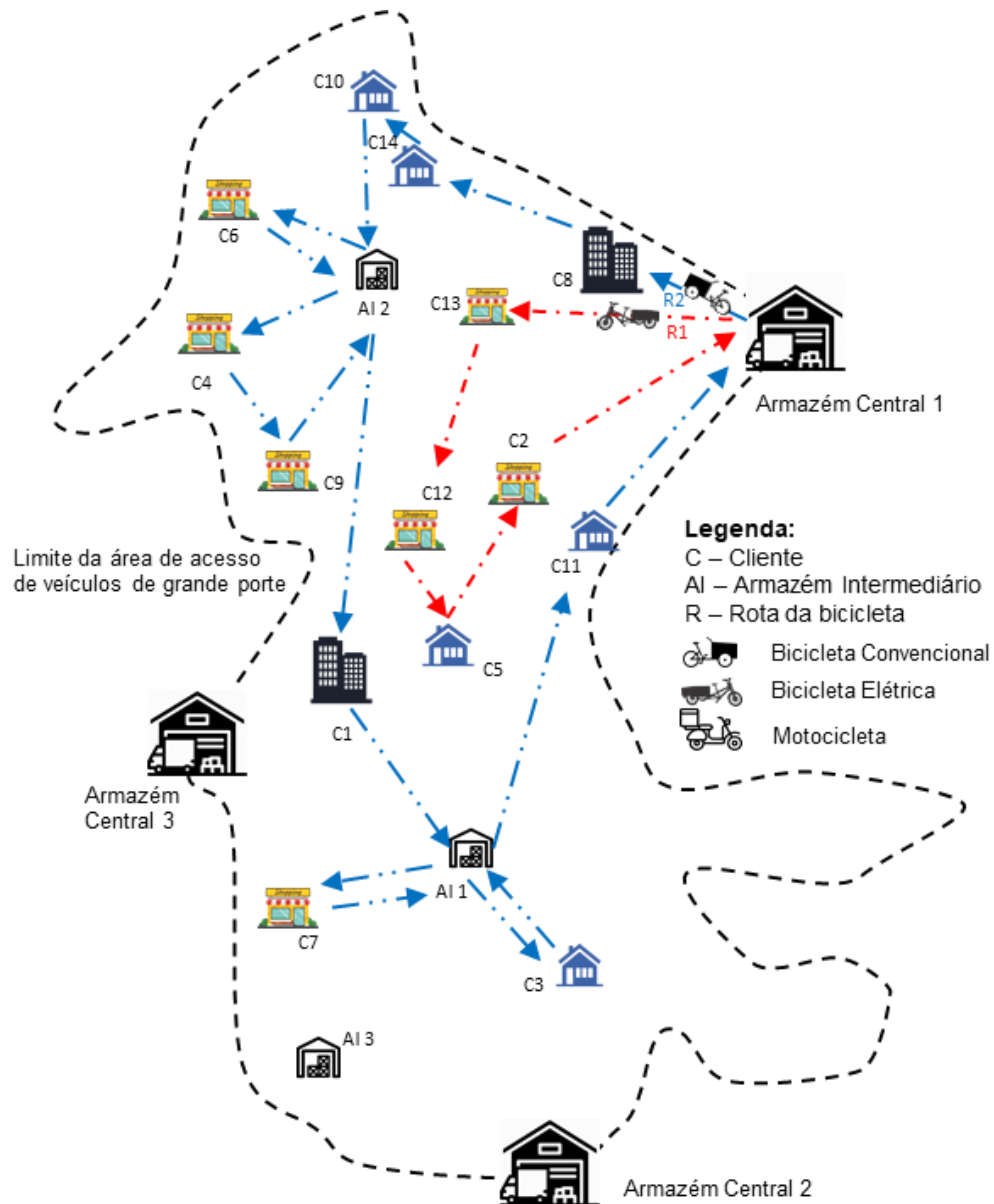
Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																						
		D		C2		C12		AI2		D														
1	Bicicleta Elétrica	Cp1		Cp2		Cp1		Cp2		Cp1		Cp2		Cp1		Cp2		Cp1		Cp2		Cp1		Cp2
		2		14		2		14		-		-		-		-		-		-		-		-
		3				3				-				-				-				-		-
		8				8				-				-				-				-		-
		20				20				-				-				-				-		-
		26				26				26				-				-				-		-
2	Bicicleta Convencional	D	AI2	C14	C10	C11	AI1	C3	AI1	C4	AI3	C9	AI2	C5	C7	AI2	C6	AI2	AI3	C13	AI3	C1	C8	D
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		21	21	21	21	21	21	12	-	4	-	21	21	9	-	-	4	-	-	22	22	1	-	-
		22	22	22	22	22	22	15	-	10	-	22	22	11	-	-	5	-	-	27	-	7	-	-
		23	23	23	23	-	-	21	21	16	-	24	-	17	-	-	22	22	22			13	-	-
		28	28	25	-	-	-	22	22	21	21			21	21	-						19	-	-
			28	28	28	-			22	22			22	22	22						22	22	-	

Fonte: do Autor.

O esquema da roteirização dos veículos na Instância 5 pode ser conferido na Figura 12. Ressalta-se que todos os edifícios, casas e lojas serão denominados clientes para simplificar o entendimento das figuras. Observando a Figura 12 em conjunto com a Tabela 5 verifica-se que na Rota R1 a bicicleta elétrica sai do Armazém Central 1 com algumas caixas em seus compartimentos e inicia a entrega no Cliente C13 e posteriormente nos Clientes C12, C5 e C2, retornando ao Armazém Central 1 com os compartimentos completamente vazios. Na Rota R2 a bicicleta convencional sai do Armazém Central 1 com algumas caixas em seus compartimentos e inicia a entrega no Cliente C8 e posteriormente nos Clientes, C14 e C10. Para atender os outros clientes, a bicicleta convencional vai para o Armazém Intermediário 2. Nele o veículo recarrega com as caixas para entregar o Cliente C6 e retorna ao Armazém Intermediário 2 para carregar as caixas da entrega dos Clientes C4 e C9. Após isso retorna mais uma vez ao Armazém Intermediário 2 e sai com as caixas para entregar ao Cliente C1. Em sequência vai ao Armazém Intermediário 1, coleta as caixas e realiza a entrega no Cliente C7. Retorna ao Armazém Intermediário 1 e sai novamente para realizar as entregas do Cliente C3. Por fim, retorna ao Armazém Intermediário 1, coleta as caixas e sai para a entrega ao Cliente C11, retornando ao Armazém Central 1 com o compartimento completamente vazio.

O modelo matemático é utilizado para planejar o dia seguinte de operação identificando quais caixas deverão ser carregadas nos veículos e em qual armazém intermediário. Assim na noite anterior a operação os veículos maiores levam as caixas para os respectivos armazéns. A mesma situação ocorre para todos os veículos em cada instância.

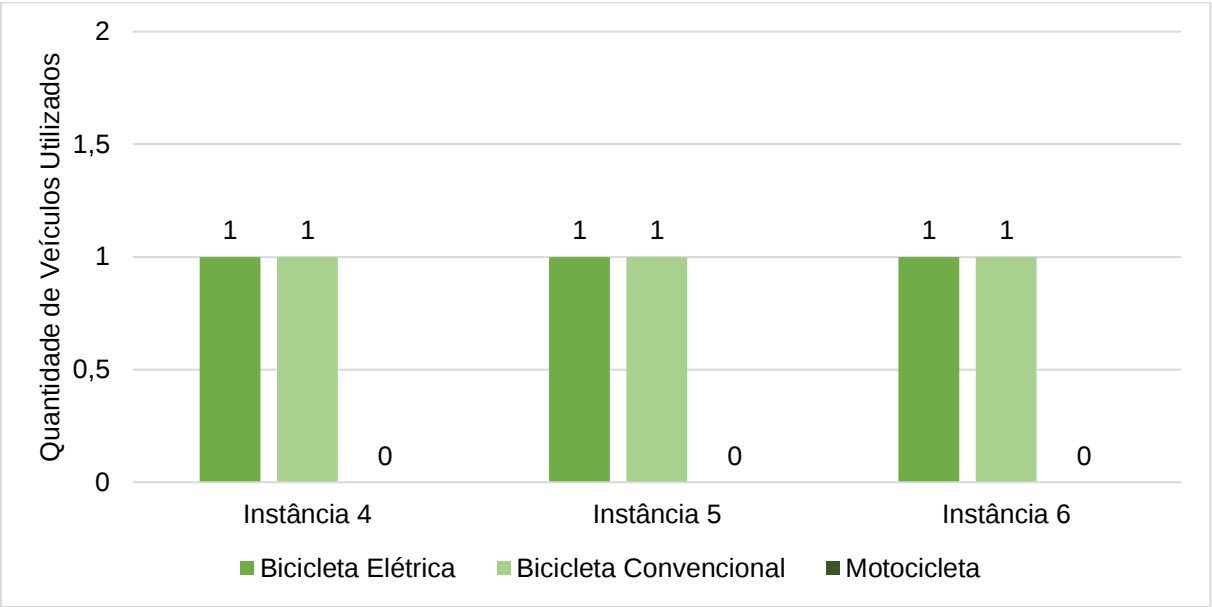
Figura 12 - Esquema das rotas dos veículos na Instância 5



Fonte: do Autor.

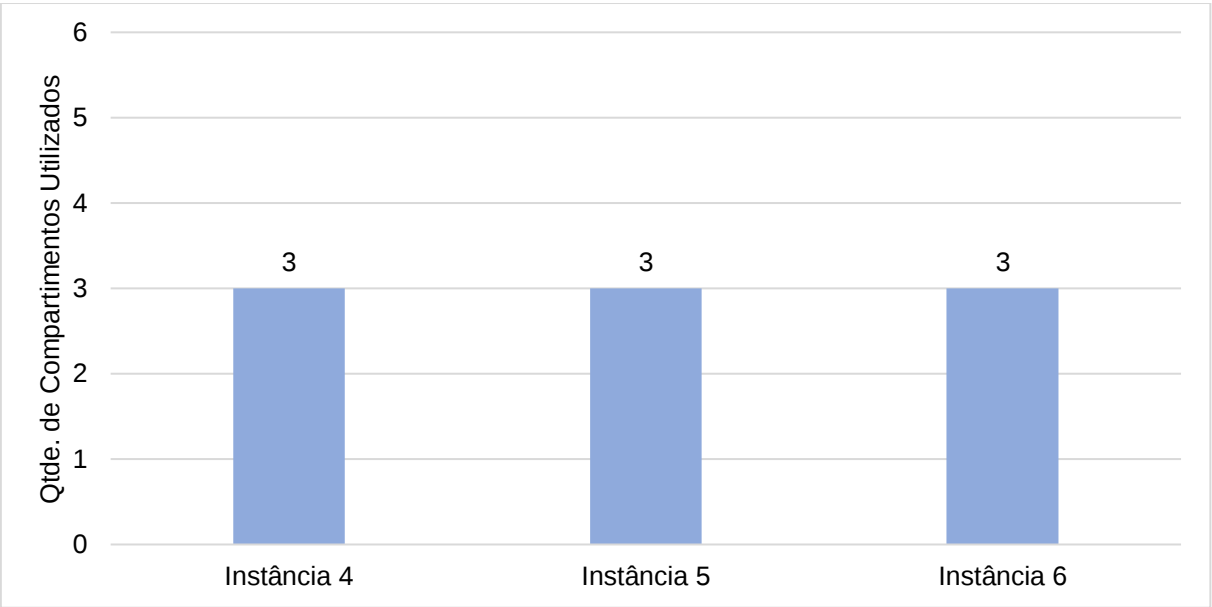
A quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 5 e 6 podem ser vistos no Gráfico 1. Como comentado anteriormente, as instâncias utilizaram a mesma quantidade e tipo de veículos para atender aos clientes que a instância base, a Instância 4, demonstrando que mesmo tendo mais armazéns intermediários disponíveis, isso não foi suficiente para modificar a quantidade de veículos utilizados no teste. O mesmo ocorre com a quantidade de compartimentos utilizados, que pode ser observado no Gráfico 2.

Gráfico 1 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4 a 6



Fonte: do Autor.

Gráfico 2 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4 a 6

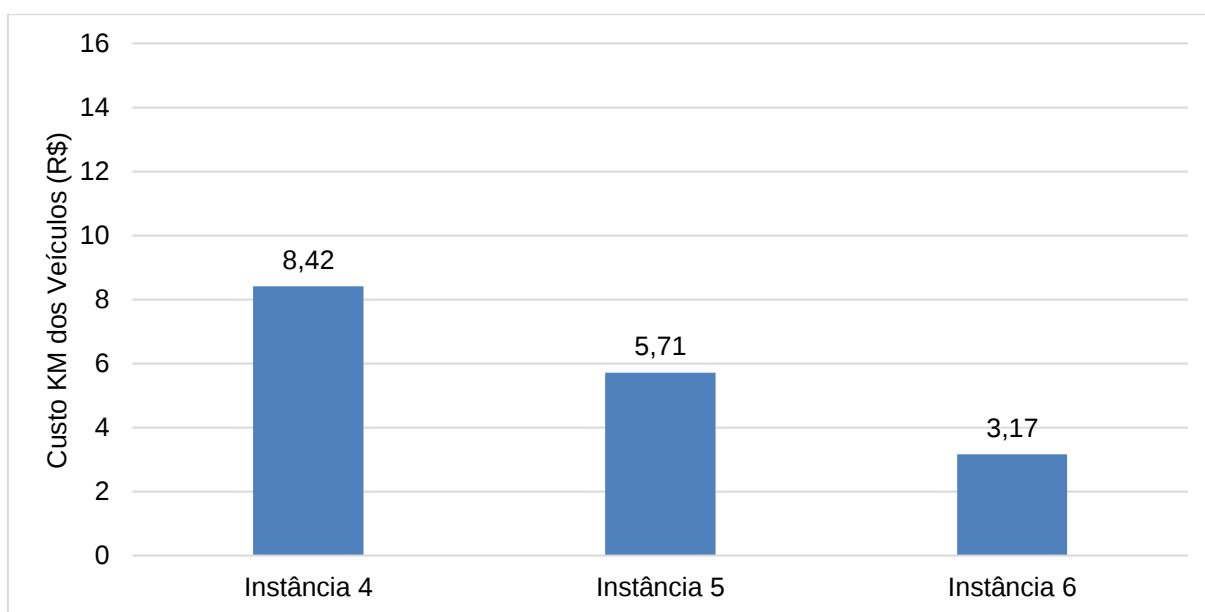


Fonte: do Autor.

Comparando os resultados obtidos nas Instâncias 5 e 6, Grupo 2, em relação à Instância 4, percebe-se pelo Gráfico 3 uma redução no custo total do quilômetro rodado pelos veículos, principalmente na Instância 6, utilizando os mesmos tipos e

quantidade de veículos, demonstrando que ter mais armazéns intermediários é a estratégia que obteve os melhores resultados para as instâncias testadas. Houve uma redução aproximada de 32,2% da Instância 5 para a 4 e de 62,4% da Instância 6 para a 4. Apesar dos bons resultados, é importante mencionar que para confirmar essa como uma estratégia viável do ponto de vista econômico-financeiro, é necessário realizar um estudo aprofundado dos custos de ter mais armazéns intermediários e então adicioná-los ao custo de transporte, o que não é o foco desta dissertação de mestrado.

Gráfico 3 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4 a 6



Fonte: do Autor.

Na Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 são apresentadas as rotas encontradas para o Grupo 3, que contempla as Instâncias 7 a 11, respectivamente. Neste grupo foi definido a disponibilidade de um armazém intermediário, um armazém central, frota de uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta, com quantidade de compartimentos específicos para cada instância, como pode ser observado na Tabela 2. Esta frota deve entregar 28 caixas com um tempo de atendimento de oito horas. A Instância 7 utilizou uma bicicleta convencional e uma motocicleta, enquanto as Instâncias 8 a 11 utilizaram uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional.

Tabela 7 - Rotas da Instância 7

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos												
		D	C8	C14	C13	C6	C10	AI1	C1	AI1	C3	AI1	C5	D
2	Bicicleta Convencional	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		5	5	5	5	5	-	-	1	-	12	-	9	-
		6	6	6	6	6	-	-	7	-	15	-	11	-
		22	22	-	-	-	-	-	13	-			17	-
		23	23	23	23	23	23	-	19	-				
		25	25	25	-	-	-	-						
		27	27	27	27	-	-	-						
4	Motocicleta	D	C9	C4	C12	C7	AI1	C2	C11	D				
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1				
		4	4	4	-	-	-	2	-	-				
		10	10	10	-	-	-	3	-	-				
		16	16	16	-	-	-	8	-	-				
		18	18	18	-	-	-	14	-	-				
		21	21	21	21	21	-	20	-	-				
		24	24	-	-	-	-	28	28	-				
		26	26	26	26	-	-							
		28	28	28	28	28	28							

Fonte: do Autor.

Tabela 8 - Rotas da Instância 8

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																
		D			C12			C5			C2			D				
1	Bicicleta Elétrica	2	3	9	2	3	9	2	3	9	2	3	-	-	-	-	-	
		Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3		
		8	17	11	8	17	11	8	17	11	8	-	-	-	-	-		
		26		14	26		14	-		14	-		14	-		-		
				20		20			20				20			-		
2	Bicicleta Convencional	D	C11	C8	C14	C10	AI1	C6	C9	C13	C7	AI1	C3	AI1	C1	AI1	C4	D
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		21	21	21	21	21	21	5	-	-	-	-	12	-	1	-	4	-
		22	22	22	-	-	-	6	-	-	-	-	15	-	7	-	10	-
		23	23	23	23	23	-	21	21	21	21	-			13	-	16	-
		24	24	24	24	24	24	24	24	-	-	-			19	-	18	-
		25	25	25	25	-	-	27	27	27	-	-						
		27	27	27	27	27	27											
		28	28	-	-	-	-											

Fonte: do Autor.

Tabela 9 - Rotas da Instância 9

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																			
		D		C5		C2		AI1		C1		C12		C13		C14		C8		D	
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2
		2	8	2	8	2	8	-	-	1	13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		3	9	3	9	3	-	-	-	7	22	-	22	-	22	-	22	-	22	-	-
		17	11	17	11	-	-	-	-	19	26	-	26	-	-	-	-	-	-	-	-
		20	14	20	14	20	14	-	-	25	27	25	27	25	27	25	-	-	-	-	-
		25	22	25	22	25	22	25	22												
			26		26		26		26												
			27		27		27		27												
2	Bicicleta Convencional	D	C11	C6	C10	AI1	C4	C7	AI1	C3	AI1	C9	D								
		Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2
		6	5	6	5	6	5	-	-	4	16	-	-	-	-	12	15	-	-	24	-
		23	21	23	21	23	21	23	21	10	21	-	21	-	-						
		28		28		-		-		18		-		-							

Fonte: do Autor.

Tabela 10 - Rotas da Instância 10

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																				
		D			C5			C2			AI1			C1			C12			D		
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3
		8	3	2	8	3	2	8	3	2	-	-	-	19	7	1	-	-	-	-	-	-
		14	26	9	14	26	9	14	26	-	-	26	-	-	13	-	-	-	-	-	-	-
		17		11	17		11	-		-	-		26			26				-		-
				20			20			20	-											
2	Bicicleta Convencional	D	C13	C9	C10	C7	AI1	C6	C14	C11	AI1	C3	AI1	C4	C8	D						
		Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1
		21	24	21	24	21	24	21	-	21	-	5	4	-	-	-	14	12	-	-	4	10
		22	27	22	27	22	-	22	-	22	-	22		22		22	22		22	18	16	-
		23		23		23		23		-		25	25	-	-					22		22
		25	25		25	25		25	25	25		28	28	28	-							-
		28	28		28	28		28	28	28												-

Fonte: do Autor.

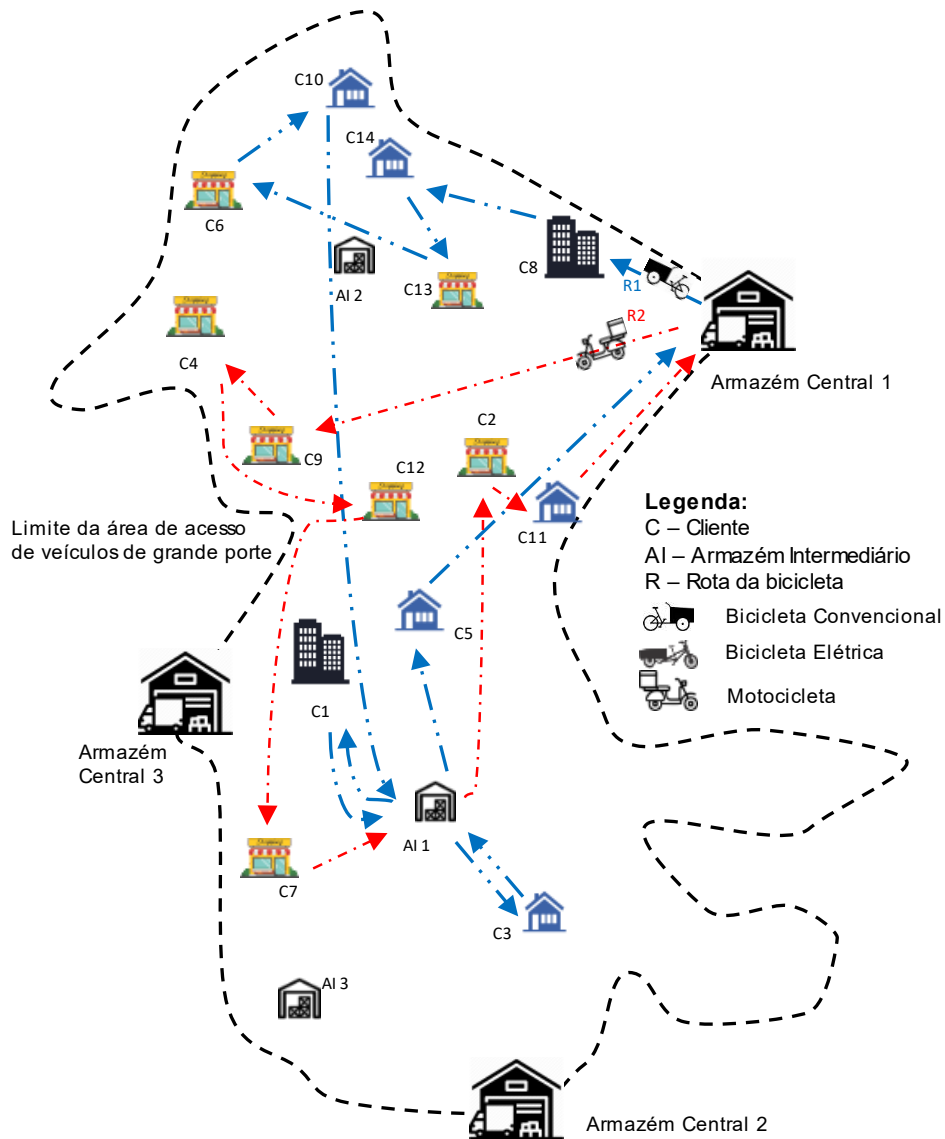
Tabela 11 - Rotas da Instância 11

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos																																				
		D			C5			C2			AI1			C3			C8			C14			C12			AI1			C1			C13			D			
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3				
		2	3	9	2	3	9	2	3	-	-	-	-	15	22	12	-	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	1	-	-	-	-	-	-	-
		17	8	11	17	8	11	-	8	-	-	-	-	26		25	26		25	26		25	26		-	-		-	13		-		-		-			
		26	20	14	26	20	14	26	20	14	26	-	-	27		27		27		27		27		27		19		-		-		-		-				
		27	22	25	27	22	25	27	22	25	27	22	25													27		27		-				-				
2	Bicicleta Convencional	D			C11			C9			C7			AI1			C10			C6			AI1			C4			D									
		Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3	Cp1	Cp2	Cp3							
		24	6	5	24	6	5	24	6	5	-	6	5	-	6	5	23	6	5	-	6	5	-	-	-	16	18	4	-	-	-	-						
		28	21		28	21		-	21		-	21		-	-													10				-						

Fonte: do Autor.

O esquema da roteirização dos veículos na Instância 7 pode ser conferido na Figura 13. Observando a Figura 13 em conjunto com a Tabela 7 verifica-se que na Rota R1 a bicicleta convencional sai do Armazém Central 1 com algumas caixas em seus compartimentos e inicia a entrega no Cliente C8 e posteriormente nos Clientes C14, C13, C6 e C10, indo em sequência ao Armazém Intermediário 1. Nele a bicicleta carrega as caixas e entrega no Cliente C1. Retorna ao Armazém Intermediário 1, carrega as caixas, e sai para entrega no Cliente C3. Por fim, passa mais uma vez no Armazém Intermediário 1 e sai para entrega no Cliente C5, retornando com o compartimento completamente vazio ao Armazém Central 1. Foi utilizado na Rota R2 uma motocicleta que saiu com caixas e iniciou as entregas nos Clientes C9 indo em sequência fazer a entrega nos Clientes C4, C12 e C7. Para atender os outros clientes a motocicleta vai ao Armazém Intermediário 1, carrega as caixas e realiza as entregas nos Clientes C2 e C11, retornando com o compartimento vazio ao Armazém Central 1.

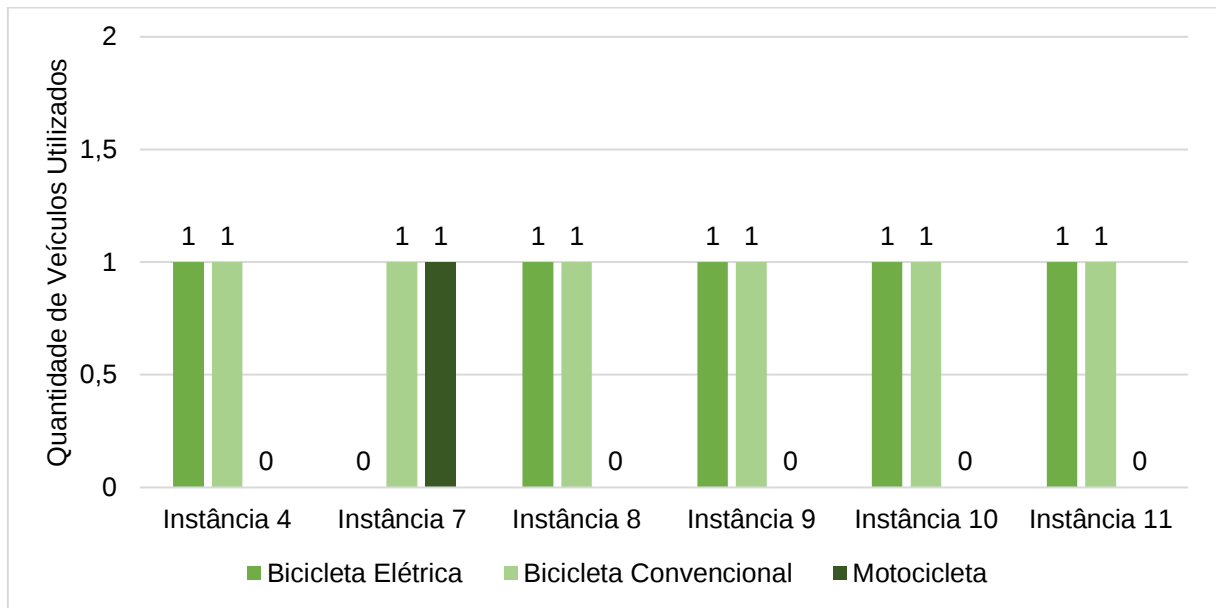
Figura 13 - Esquema das rotas dos veículos na Instância 7



Fonte: do Autor.

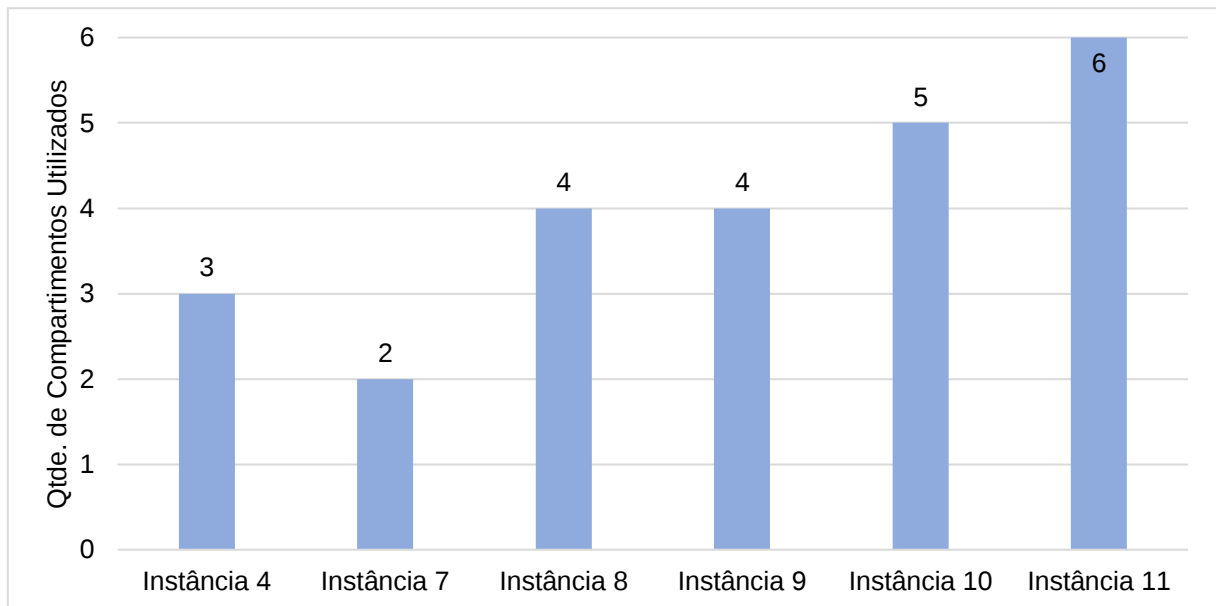
A quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 7 a 11 podem ser vistos no Gráfico 4. A Instância 7 foi a única que se diferenciou da instância base, utilizando uma motocicleta ao invés de uma bicicleta elétrica, aumentando o custo de transporte, como pode ser observado na Tabela 4. No Gráfico 5 é possível observar que com a mesma quantidade e tipo de veículos, as instâncias utilizaram o máximo de compartimentos disponíveis. Isto demonstrou que mesmo com alteração na quantidade de compartimentos disponíveis nos veículos, isso não foi suficiente para provar a estratégia como a melhor economicamente nos testes realizados.

Gráfico 4 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 7 a 11



Fonte: do Autor.

Gráfico 5 – Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 7 a 11

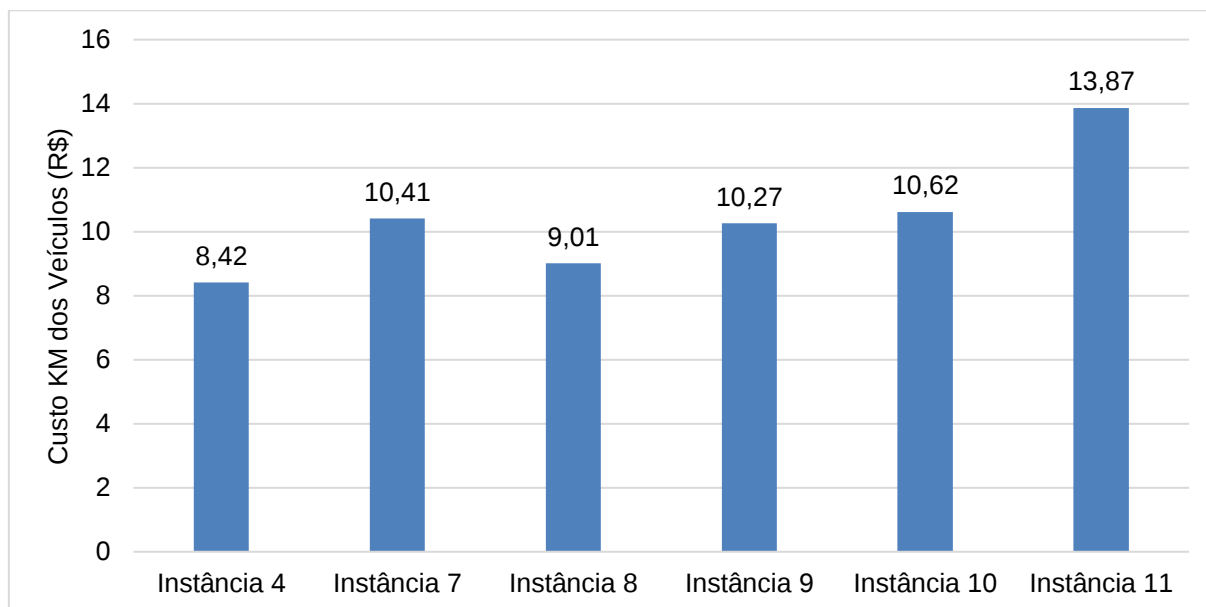


Fonte: do Autor.

Comparando os resultados obtidos nas Instâncias 7 a 11, Grupo 3, em relação a Instância 4, percebe-se pelo Gráfico 6 um aumento no custo do quilômetro rodado

pelos veículos, principalmente na Instância 7 e 11, 23,6% e 64,7%, respectivamente. Isto é devido a utilização de uma motocicleta, na Instância 7, e mais paradas no armazém intermediário disponível para realizar as entregas, na Instância 11. Todas as outras instâncias tiveram o custo do quilômetro rodado próximos a instância base.

Gráfico 6 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 7 a 11



Fonte: do Autor.

Na Tabela 12 e Tabela 13 são apresentadas as rotas encontradas para o Grupo 4, que contempla as Instâncias 12 e 13, respectivamente. Neste grupo foi definido a disponibilidade de dois armazéns centrais para a Instância 12 e três armazéns centrais para a Instância 13, frota de uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta, com quantidade de compartimentos específicos para cada veículo, como pode ser observado na Tabela 2. Esta frota deve entregar 28 caixas com um tempo de atendimento de oito horas. Tanto a Instância 12 como a 13 utilizaram uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional.

Tabela 12 - Rotas da Instância 12

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos														
		D2		C2		C5		C12		C14		C10		D1		
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	
		2	3	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		9	8	9	8	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		17	11	17	11	17	11	-	-	-	-	-	-	-	-	
		23	14	23	14	23	-	23	-	23	-	23	-	-	-	
		25	20	25	20	25	-	25	-	25	-	-	-	-	-	
		26	26	26	26	26	26	26	26	25	-	-	-	-	-	
3	Bicicleta Convencional	D1	C8	C13	C6	C9	C7	AI1	C3	AI1	C4	AI1	C1	AI1	C11	D1
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		5	5	5	5	-	-	-	12	-	4	-	1	-	28	-
		6	6	6	6	-	-	-	15	-	10	-	7	-	-	-
		21	21	21	21	21	21	-	-	-	16	-	13	-	-	-
		22	22	-	-	-	-	-	-	-	18	-	19	-	-	-
		24	24	24	24	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		27	27	27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: do Autor.

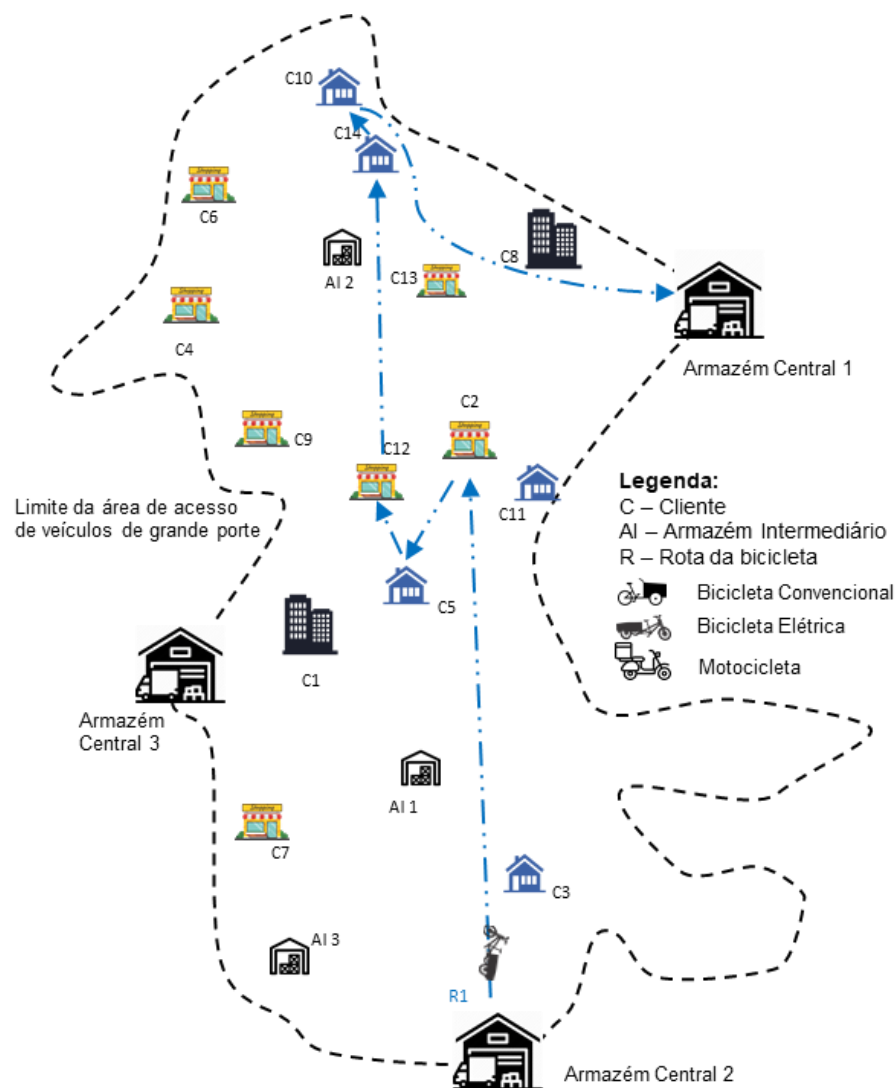
Tabela 13 - Rotas da Instância 13

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos															
		D3		C12		C5		C2		C9		D3					
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2
		2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
		8	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9
		11	17	11	17	11	17	11	17	11	17	11	17	11	17	11	17
		14		14		14		14		14		14		14		14	
		20		20		20		20		20		20		20		20	
		24		24		24		24		24		24		24		24	
26		26		-		-		-		-		-		-		-	
2	Bicicleta Convencional	D1	C6	C13	C14	C10	AI1	C11	AI1	C3	AI1	C4	C7	AI1	C1	C8	D3
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		5	5	-	-	-	-	21	21	12	-	4	-	-	1	-	-
		6	6	-	-	-	-	22	22	15	-	10	-	-	7	-	-
		21	21	21	21	21	21	28	-	21	-	16	-	-	13	-	-
		22	22	22	22	22	22			22	22	18	-	-	19	-	-
		23	23	23	23	23	-					21	21	-	22	22	-
		25	25	25	25	-	-					22	22	22			
		27	27	27	-	-	-										

Fonte: do Autor.

O esquema da roteirização da bicicleta elétrica na Instância 12 pode ser conferido na Figura 14. Foi demonstrado somente a Rota R1 para bom entendimento da figura. Observando a Figura 14 em conjunto com a Tabela 12 verifica-se que na Rota R1 a bicicleta elétrica sai do Armazém Central 2 com algumas caixas em seus compartimentos e inicia a entrega no Cliente C2 e posteriormente nos Clientes C5, C12, C14 e C10. Por fim, com a possibilidade de retornar para qualquer armazém, a bicicleta elétrica finaliza a sua rota com os compartimentos completamente vazios no Armazém Central 1.

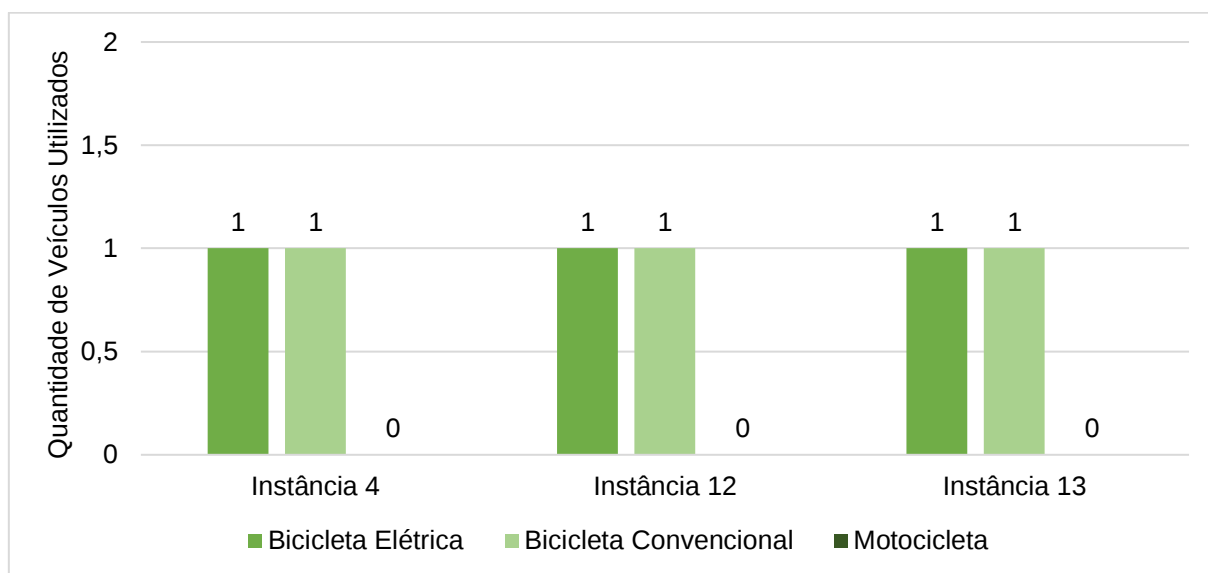
Figura 14 - Esquema da Rota R1 da Bicicleta Elétrica na Instância 12



Fonte: do Autor.

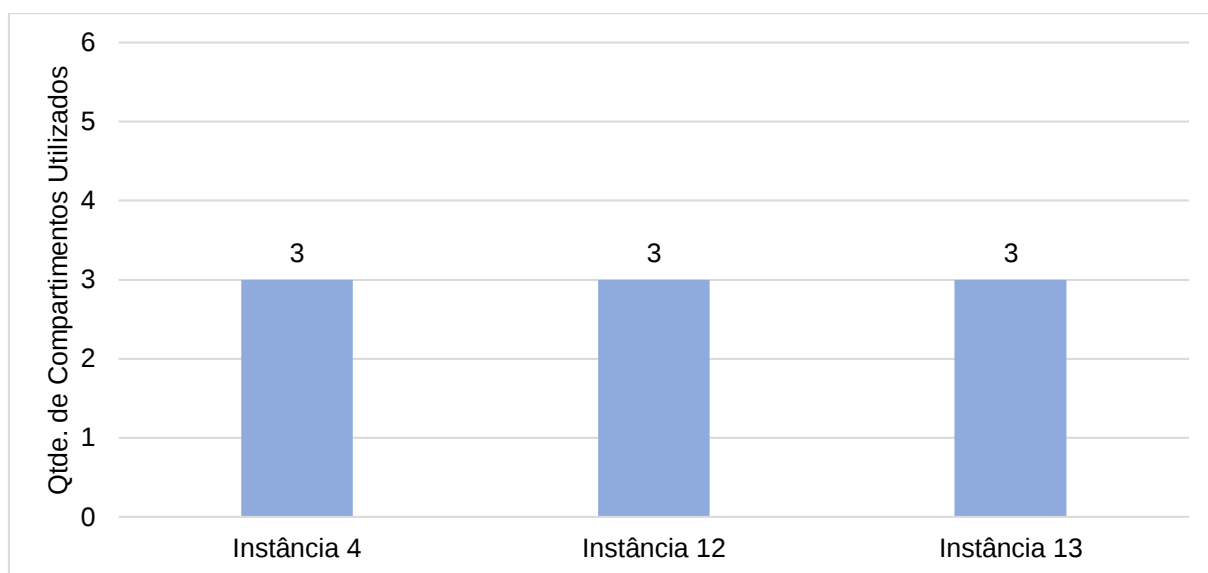
A quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 12 e 13 podem ser vistos no Gráfico 7. As instâncias utilizaram a mesma quantidade e tipo de veículos para atender aos clientes que a instância base, a Instância 4, demonstrando que mesmo tendo mais armazéns centrais disponíveis, isso não foi suficiente para modificar a quantidade de veículos utilizados no teste. O mesmo ocorre com a quantidade de compartimentos utilizados, que pode ser observado no Gráfico 8.

Gráfico 7 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 12 e 13



Fonte: do Autor.

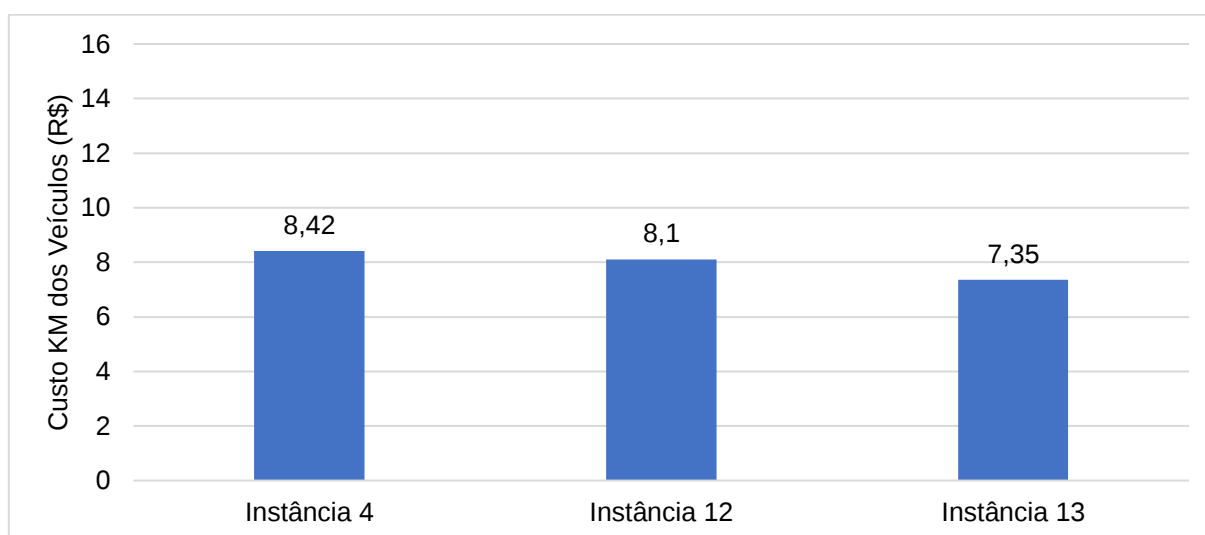
Gráfico 8 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 12 e 13



Fonte: do Autor.

Quando se analisa a maior disponibilidade de armazéns centrais, Grupo 4, Instâncias 12 e 13, é possível notar pelo Gráfico 9 uma ligeira redução no custo total do quilômetro rodado pelos veículos quando comparado com a Instância 4, utilizando os mesmos tipos e quantidade de veículos para as instâncias testadas. Houve uma redução aproximada de 3,8% da Instância 12 para a 4 e de 13,0% da Instância 13 para a 4. Assim como no Grupo 2, é importante mencionar que é preciso fazer um estudo econômico-financeiro para ser assertivo quanto a viabilidade de se ter mais armazéns centrais. Outro ponto importante é que mesmo não evidenciando ganhos representativos, pode ser que para instâncias de maior porte, mais próximo da realidade de uma empresa de logística, o aumento do número de armazéns centrais disponíveis seja mais vantajoso.

Gráfico 9 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 12 e 13



Fonte: do Autor.

Na Tabela 14 e Tabela 15 são apresentadas as rotas encontradas para o Grupo 5, que contempla as Instâncias 14 e 15, respectivamente. Neste grupo foi definido a disponibilidade de um armazém central, frota de uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta, com quantidade de compartimentos específicos para cada veículo, como pode ser observado na Tabela 2. Esta frota deve entregar 28 caixas com janela de tempo de cinco horas para a Instância 14 e onze horas para a Instância 15. Tanto a Instância 14 como a 15 utilizaram uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional.

Tabela 14 - Rotas da Instância 14

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos															
		D		C9		C2		C12		AI1		C1		C5		D	
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2
		3	2	3	2	3	2	.	.	.	.	7	1	.	.	.	.
		9	8	9	8	9	8	9	.	9	.	9	17	9	17	.	.
		11	17	11	17	11	17	11	17	11	17	11		11		.	.
		14	20	14	20	14	20	.	.	.	.	13		.	.	.	.
			24		24		.		.		.	19		.		.	.
			26		26		26		26		26						
2	Bicicleta Convencional	D	C11	AI1	C10	C6	C13	C7	AI1	C4	AI1	C3	C14	C8	D		
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		5	5	5	5	5	.	.	.	4	.	12	.	.	.	.	.
		6	6	6	6	6	.	.	.	10	.	15	.	.	22	.	.
		21	21	21	21	21	21	21	.	16	.	22	22	22	.	.	.
		22	22	22	22	22	22	22	22	18	.	25	25	.	.	.	.
		25	25	25	23	.	.	.	.	22	22						
		27	27	27	25	25	25	25	25	25	25						
		28	28	.	27	27	27	.	.								

Fonte: do Autor.

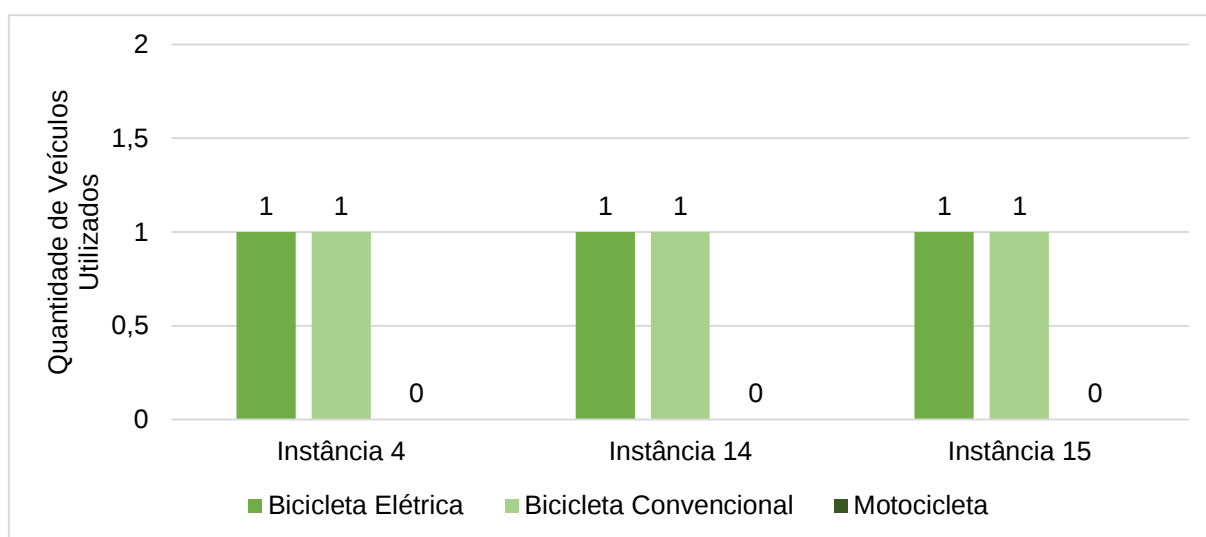
Tabela 15 - Rotas da Instância 15

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos														
		D		C5		C2		C10		C12		C13		D		
1	Bicicleta Elétrica	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	Cp1	Cp2	
		2	3	2	3	2	3	-	-	-	-	-	-	-	-	
		11	8	11	8	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	
		14	9	14	9	14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
		17	23	17	23	-	23	-	23	-	-	-	-	-	-	
		20		20		20		-		-		-		-		
		26		26		26		26		26		-		-		
		27		27		27		27		27		27		-		
2	Bicicleta Convencional	D	C8	C14	C9	C6	C11	AI1	C3	AI1	C7	AI1	C1	AI1	C4	D
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		5	5	5	5	5	-	-	12	-	21	-	1	-	4	-
		6	6	6	6	6	-	-	15	-			7	-	10	-
		22	22	-	-	-	-	-					13	-	16	-
		24	24	24	24	-	-	-					19	-	18	-
		25	25	25	-	-	-	-								
		28	28	28	28	28	28	-								

Fonte: do Autor.

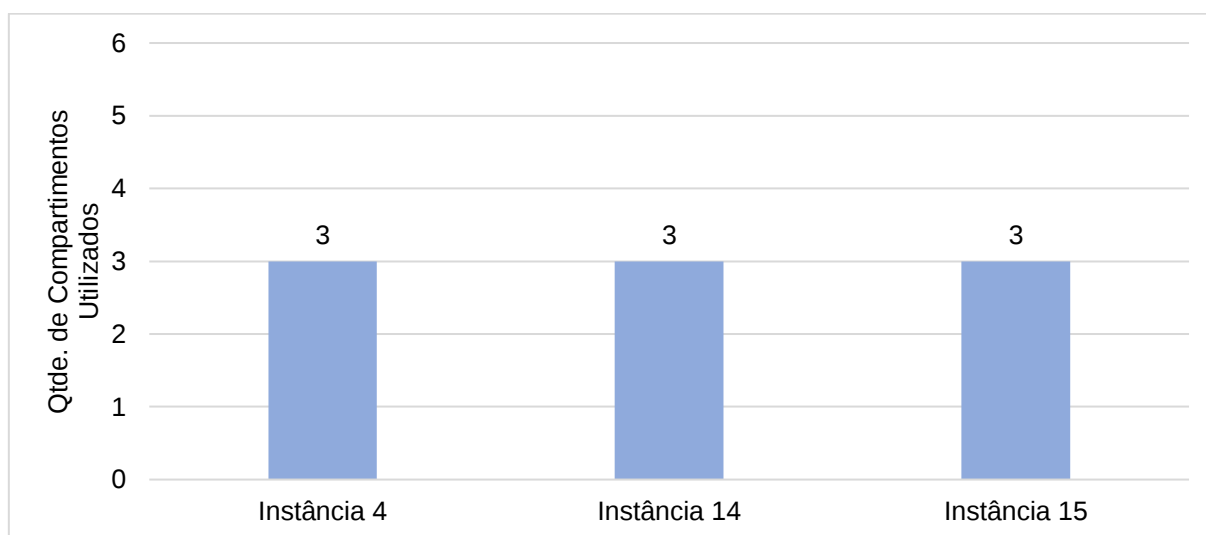
A quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 14 e 15 podem ser vistos no Gráfico 10. As instâncias utilizaram a mesma quantidade e tipo de veículos para atender aos clientes que a instância base, a Instância 4, demonstrando que mesmo tendo um maior tempo na janela de tempo de atendimento, isso não foi suficiente para modificar a quantidade de veículos utilizados no teste. O mesmo ocorre com a quantidade de compartimentos utilizados, que pode ser observado no Gráfico 11.

Gráfico 10 - Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4, 14 e 15



Fonte: do Autor.

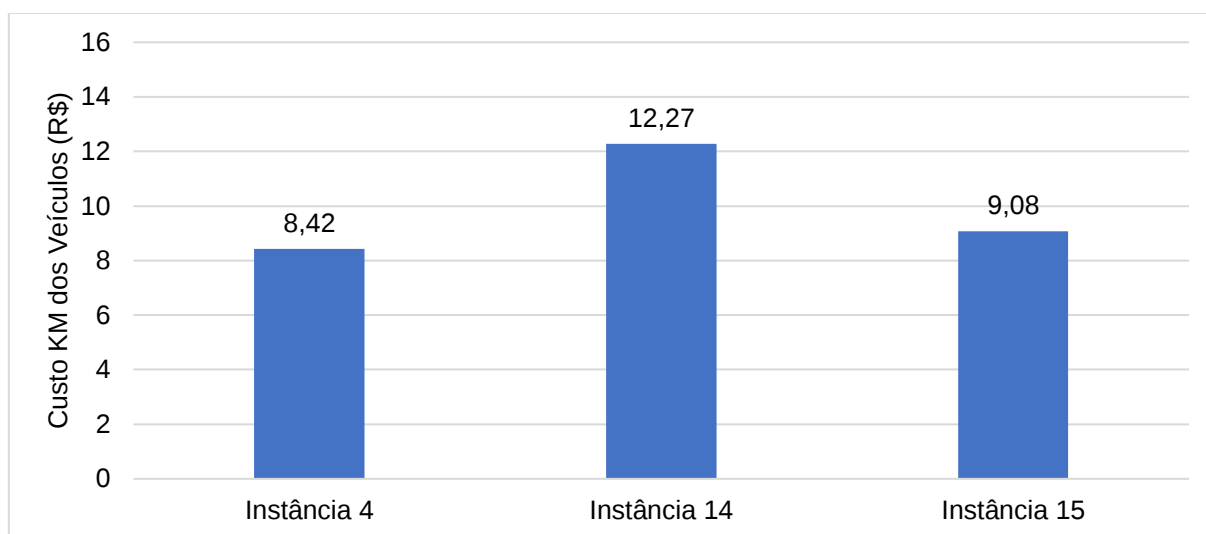
Gráfico 11 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4, 14 e 15



Fonte: do Autor.

Nas Instâncias 14 e 15, do Grupo 5, onde foi testada a estratégia de variação da janela de tempo de atendimento nos clientes e armazém intermediário, é possível notar pelo Gráfico 12 um aumento no custo total do quilômetro rodado pelos veículos quando comparado com a Instância 4, principalmente na Instância 14, utilizando os mesmos tipos e quantidade de veículos para as instâncias testadas. Houve um aumento aproximado de 45,7% da Instância 14 para a 4 e de 7,8% da Instância 15 para a 4. Apesar do resultado, é importante mencionar a complexidade em alterar e aplicar um padrão para o tempo de atendimento em cada estabelecimento, devido a cada um ter a sua própria regra de funcionamento. Portanto, não é possível dizer se essa estratégia poderia ser posta em prática.

Gráfico 12 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4, 14 e 15



Fonte: do Autor.

Na Tabela 16 são apresentadas as rotas encontradas para o Grupo 6, que contempla a Instância 16. Neste grupo foi definido a disponibilidade de um armazém central, frota de uma bicicleta elétrica, duas bicicletas convencionais e uma motocicleta, com quantidade de compartimentos específicos para cada veículo, como pode ser observado na Tabela 2. Esta frota deve entregar 28 caixas com uma janela de tempo de atendimento de oito horas para a Instância 16. A principal diferença da Instância 16 em relação a instância base, é que não considera a restrição de acesso. Neste caso foram utilizados uma bicicleta elétrica e duas bicicletas convencionais.

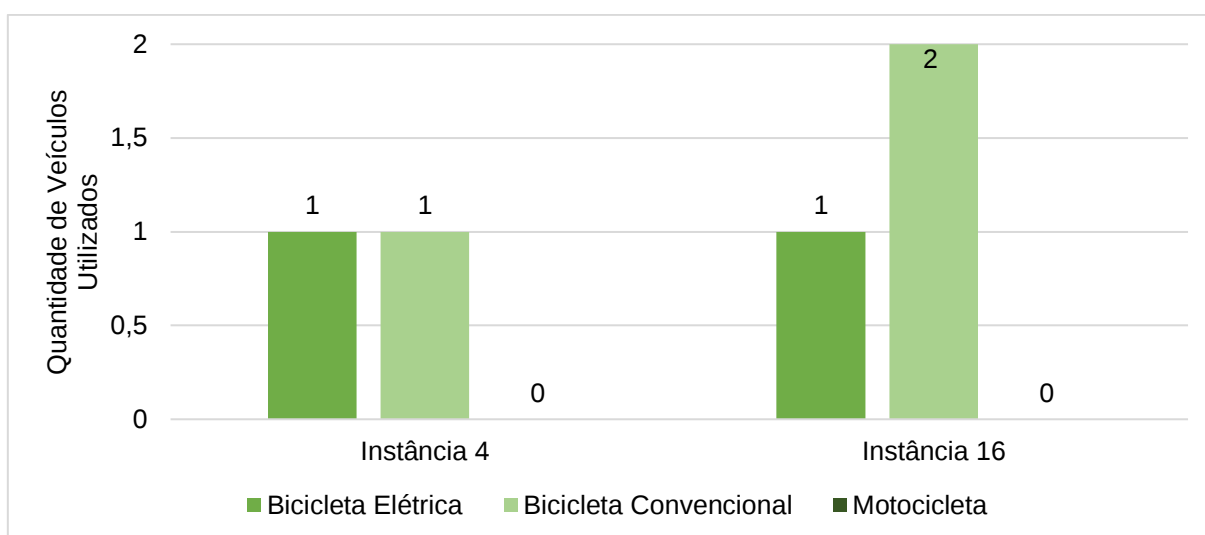
Tabela 16 - Rotas da Instância 16

Veículo	Tipo	Rotas e Compartimentos														
		D		C8		C3		C6		D						
1	Bicicleta Elétrica	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	5 Cp1	6 Cp2	
		15	12 22	15	12 22	15	12 -	-	12 -	-	12 -	-	12 -	-	12 -	
2	Bicicleta Convencional	D				C1				D						
		1 Cp1				1 Cp1				1 Cp1						
		7				7				7						
		13				13				13						
		19				19				19						
3	Bicicleta Convencional	D	C13	C9	C10	A11	C5	C11	A11	C2	C7	A11	C4	C12	C14	D
		Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1	Cp1
		21	21	21	21	21	9	-	-	2	-	-	4	-	-	-
		23	23	23	23	-	11	-	-	3	-	-	10	-	-	-
		24	24	24	-	-	17	-	-	8	-	-	16	-	-	-
		25	25	25	25	25	21	21	21	14	-	-	18	-	-	-
		26	26	26	26	26	25	25	25	20	-	-	25	25	25	-
		27	27	-	-	-	26	26	26	21	21	-	26	26	-	-
28	28	28	28	28	28	28	-	25	25	25						
									26	26	26					

Fonte: do Autor.

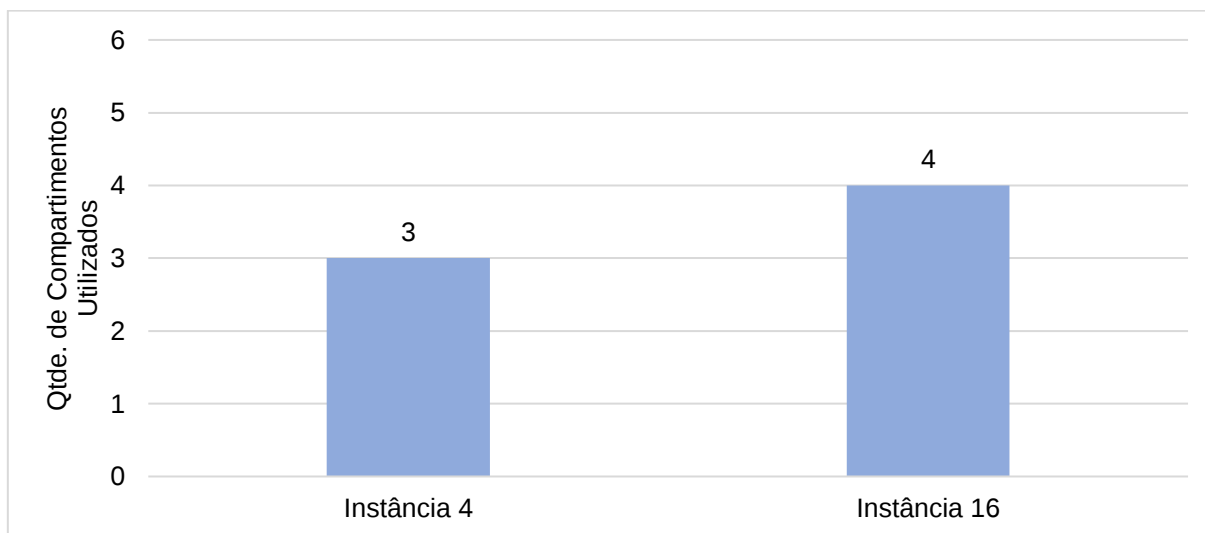
A quantidade de veículos utilizados na Instância 16 pode ser visto no Gráfico 13. A instância utilizou, além da bicicleta elétrica também usada na Instância 4, duas bicicletas convencionais e nenhuma motocicleta. Por empregar duas bicicletas convencionais, pode ser observado no Gráfico 14 um aumento na quantidade total de compartimentos utilizados. Isto demonstra que retirando a restrição de acesso há um número maior de possibilidades de solução, degradando os resultados para os testes realizados na Instância 16.

Gráfico 13 -Quantidade de veículos utilizados nas Instâncias 4 e 16



Fonte: do Autor.

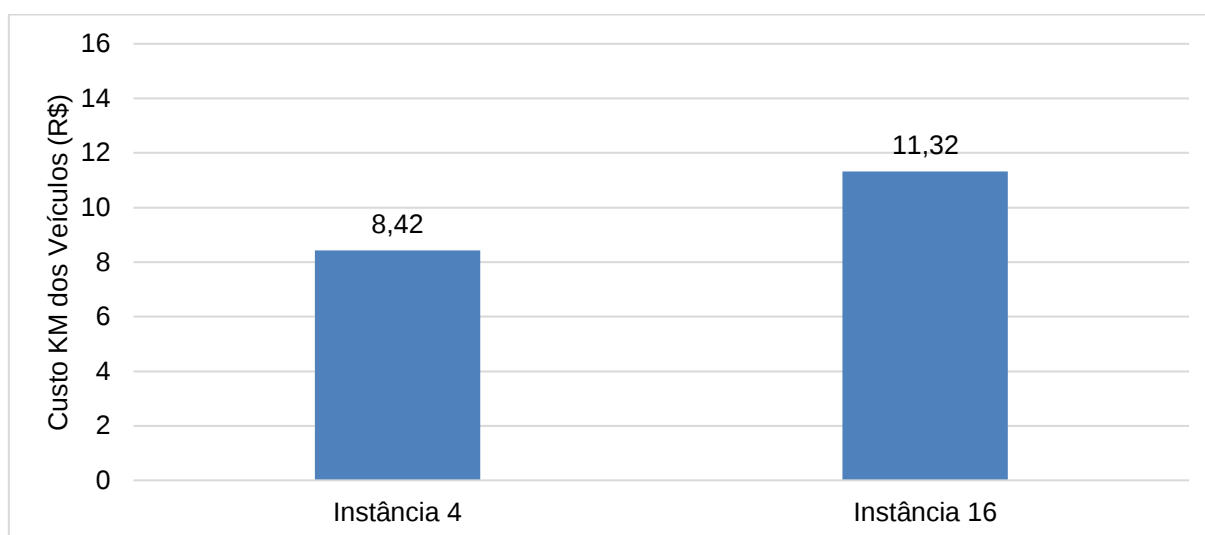
Gráfico 14 - Quantidade total de compartimentos utilizados nas Instâncias 4 e 16



Fonte: do Autor.

Em relação a Instância 16, do Grupo 6, onde foi testada a retirada da restrição de acesso, é possível observar no Gráfico 15 um aumento no custo total do quilômetro rodado pelos veículos quando comparado com a Instância 4. Houve um aumento aproximado de 34,4% da Instância 16 para a 4. Com os testes realizados nesta instância é possível observar que a restrição de acesso pode ajudar a melhorar a viabilidade econômica e operacional da empresa, mesmo apresentando um *gap* relativamente alto para as instâncias testadas.

Gráfico 15 - Custo total do quilômetro rodado pelos veículos nas Instâncias 4 e 16



Fonte: do Autor.

No Grupo 7 foi feito o teste de incompatibilidade de caixas no compartimento, considerando, neste caso, a Instância 1 como base para comparar com a instância do grupo, a Instância 17, variando somente a incompatibilidade entre as caixas nos compartimentos, no caso o parâmetro $mc_{u,\alpha}$ para zero entre as caixas que não poderiam ir juntas no mesmo compartimento e um para as caixas que podem ir juntas no mesmo compartimento. As alterações no parâmetro foram realizadas randomicamente.

Os testes podem ser observados na Tabela 17. A primeira coluna representa a variação da Instância 1 realizada em cada teste. A segunda coluna demonstra as caixas incompatíveis em um mesmo compartimento que são consideradas na variação. A terceira coluna, FO, representa o valor obtido na Função Objetivo. A

quarta e última coluna, TE, representa o tempo de execução do CPLEX. Na coluna Incompatibilidade entre Caixas foi considerado o acúmulo das modificações realizadas anterior a variação a partir da Variação 1.2.

Tabela 17 – Análise de Incompatibilidade entre Caixas

Variações Instância 1	Incompatibilidade entre Caixas	FO	TE (s)
1.1	(C6/C15)	64.932,49	27,22
1.2	Variação 1.1 e (C6/C11)	64.932,49	23,89
1.3	Variação 1.2 e (C7/C8)	64.931,43	58,44
1.4	Variação 1.3 e (C3/C17)	64.932,49	40,19
1.5	Variação 1.4 e (C1/C6)	64.938,13	36,84
1.6	Variação 1.5 e (C2/C11)	64.938,13	31,17
1.7	Variação 1.6 e (C2/C4)	64.938,13	27,28
1.8	Variação 1.7 e (C4/C3)	64.938,13	31,02
1.9	Variação 1.8 e (C4/C10)	79.539,31	25,75
1.10	Variação 1.9 e (C5/C14)	79.539,31	18,06
1.11	Variação 1.10 e (C8/C13)	79.538,65	28,73
1.12	Variação 1.11 e (C9 /C13)	79.591,72	19,44
1.13	Variação 1.12 e (C10/C16)	79.586,54	33,67
1.14	Variação 1.13 e (C16/C18)	79.586,54	30,08
1.15	Variação 1.14 e (C5/C16)	Não existe solução para o problema	-
1.16	Variação 1.14 e (C14/C20)	79.586,54	57,5
1.17	Variação 1.16 e (C14/C19)	79.591,79	83,05
1.18	Variação 1.17 e (C14/C18)	79.586,54	38,84
1.19	Variação 1.18 e (C14/C17)	79.586,54	55,28
1.20	Variação 1.19 e (C14/C16)	79.586,54	58,03
1.21	Variação 1.20 e (C14/C15)	79.586,54	26,83
1.22	Variação 1.21 e (C12/C18)	79.592,46	53,17
1.23	Variação 1.22 e (C13/C17)	79.591,79	49,66
1.24	Variação 1.23 e (C14/C19)	79.591,79	40,47
1.25	Variação 1.24 e (C15/C20)	79.592,56	70,13
1.26	Variação 1.25 e (C10/C18)	Não existe solução para o problema	-
1.27	Variação 1.25 e (C16/C17)	79.591,79	69,58
1.28	Variação 1.25 e (C16/C19)	79.592,46	75,09
1.29	Variação 1.25 e (C16/C20)	79.592,46	51,64
1.30	Variação 1.29 e (C17/C18)	79.592,56	44,7
1.31	Variação 1.30 e (C18/C20)	110.884,84	36,89
1.32	Variação 1.30 e (C18/C19)	96.282,84	17,44
1.33	Variação 1.32 e (C19/C20)	96.284,54	17,63

Fonte: do Autor.

É importante destacar as variações 1.9, 1.15, 1.22, 1.26, 1.31 e 1.32. As variações 1.9, 1.22, 1.31 e 1.32 apresentam um aumento considerável da FO em relação aos testes anteriores respectivos, ocorrido devido a uma utilização de mais veículos e,

possivelmente, de mais armazéns intermediários. Com isso evidencia-se a importância dos múltiplos compartimentos para poder acomodar caixas que não são compatíveis. Já as variações 1.15 e 1.26 demonstraram que mesmo tendo veículos com múltiplos compartimentos, o CPLEX não encontrou nenhuma solução factível para o teste realizado com o determinado arranjo do parâmetro $mc_{u,\alpha}$.

O Grupo 8, composto pelas Instâncias 18, 19 e 20, tinha o objetivo de testar se o modelo matemático encontraria solução para 15, 16 e 17 clientes, respectivamente, considerando 4 horas de janela de tempo de atendimento. Em todas as instâncias, o CPLEX não encontrou nenhuma solução factível após 24 horas executando o modelo matemático, encontrando apenas um LB. O mesmo aconteceu com o Grupo 9, que retrata um local com alta concentração populacional. Mesmo disponibilizando uma quantidade maior de armazéns intermediários e de veículos para entregar 34 e 45 caixas, respectivamente, o CPLEX não encontrou nenhuma solução factível após 24 horas executando o modelo matemático. Isto reforça a necessidade da continuidade dos estudos a respeito do assunto, criando uma meta-heurística para solucioná-lo.

Dos resultados apurados, nota-se que para as instâncias testadas o aumento de armazéns intermediários disponíveis, Instância 6, foi a que trouxe os melhores resultados. Isto se deve ao fato de que todas as demandas dos clientes foram atendidas com a utilização de uma bicicleta elétrica e uma bicicleta convencional, que passaram pelos três armazéns intermediários disponíveis, obtendo principalmente um custo total menor para o quilômetro rodado. Esta redução pode ser ainda mais expressiva com a utilização de mais veículos para entrega de mais caixas aos clientes.

Como não foi possível comparar os resultados com os dados da empresa, por motivo da realização do estudo de viabilidade econômica e operacional, os testes das instâncias avaliadas evidenciaram ganhos nos resultados com um número maior de armazéns intermediários. Esta dissertação apresentou um modelo matemático que atende ao problema estudado, incorporando características operacionais reais. Ele foi aplicado em instâncias que representam situações cotidianas da futura operação da empresa.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um modelo matemático para o planejamento de logística urbana dentro de grandes cidades com restrição de entrada de veículos de grande porte, considerando particularidades e restrições encontradas no problema real. O modelo se difere dos demais trabalhos publicados por incorporar a utilização de múltiplos armazéns centrais, restrição de acesso, janela de tempo de atendimento no cliente e armazém intermediário, armazéns intermediários para reabastecimento, múltiplos compartimentos e utilização de veículos de pequeno porte. Outra diferença está na alocação unitária das caixas dentro dos múltiplos compartimentos, não encontrados nos trabalhos sobre o tema. O objetivo do modelo é minimizar os custos logísticos, representado por custo de utilização, quilômetro rodado do veículo e o tempo total de viagem dos veículos. O modelo foi denominado *Site-Dependent Multi-Depot Compartment Vehicle Routing Problem with Intermediate Replenishment Facilitie and Time Windows*.

A validação do modelo se deu pela aplicação em uma empresa que está estudando a viabilidade econômica e operacional no município de Vitória, Espírito Santo. Com base em dados preliminares do estudo, instâncias foram criadas com variações nos parâmetros: número maior de armazéns intermediários e centrais disponíveis, quantidade de compartimentos disponíveis em cada veículo, janela de tempo de atendimento nos clientes e armazém intermediário, restrição de acesso, incompatibilidade entre cargas e aplicação em cidades com mais clientes para atendimento.

Foi possível observar nas instâncias do Grupo 2, nas quais aumentou-se o número de armazéns intermediários disponíveis, os menores custos logísticos entre os grupos definidos. No entanto, é importante mencionar a necessidade de um estudo aprofundado dos custos de ter mais armazéns intermediários e confirmar sua viabilidade do ponto de vista econômico-financeiro.

A variação dos compartimentos, Grupo 3, também foi testado e apresentou resultados do custo de transporte maior do que apresentado na instância base, a Instância 4, possivelmente pela utilização de uma motocicleta e por mais paradas

nos armazéns intermediários. Quanto a maior disponibilidade de armazéns centrais, Grupo 4, houve uma ligeira redução no custo de transporte real. Como no aumento de armazéns intermediários disponíveis, é importante realizar o mesmo estudo e acrescentar os custos aos custos logísticos para confirmar a viabilidade. Também é importante frisar que em instâncias de maior porte essa estratégia pode ser mais vantajosa.

Outro teste realizado foi a variação da janela de tempo de atendimento nos clientes e no armazém intermediário, Grupo 5, que apresentou resultados razoáveis. No entanto, ressalta-se a complexidade em alterar e aplicar um padrão para o tempo de atendimento em cada cliente e armazém intermediário. A retirada da restrição de acesso também foi analisada, Grupo 6, e apresentou resultados piores do que Instância 4, que possuía restrição de acesso.

Em relação ao teste sobre a incompatibilidade de cargas, realizado no Grupo 7, evidenciou-se a importância dos múltiplos compartimentos. Instâncias maiores também foram testadas, Grupos 8 e 9, com o intuito de avaliar a aplicação do modelo matemático em situações de grande porte. Os testes demonstraram que o CPLEX não encontrou nenhuma solução factível após 24 horas de execução, encontrando apenas um LB.

Mesmo sem a comparação com resultados com os dados da empresa, por motivo da realização do estudo de viabilidade, entende-se que o modelo matemático atende ao problema estudado, pois incorpora situações cotidianas da futura operação da empresa e é uma boa ferramenta para tomadores de decisão planejarem a logística urbana em grandes centros com restrições de entrada de veículos de maior porte. Além da aplicação tratada nesta dissertação, o modelo pode ser aplicado em diversos problemas de roteirização de veículos com as restrições definidas, como recarregamento de baterias em carros elétricos e coleta de recicláveis.

Sugere-se como trabalhos futuros o desenvolvimento de uma meta-heurística para resolver testes com instâncias considerando mais clientes, frota e caixas, sendo que o CPLEX não consegue encontrar soluções ótimas para grandes instâncias. Por fim recomenda-se a realização do estudo de viabilidade econômico-financeiro para implantar mais armazéns intermediários e centrais, e adicioná-los ao custo de transporte.

REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, F. Ben; ROUCAIROL, C.; BACHA, C. Deliveries of liquid fuels to SNDP gas stations using vehicles with multiple compartments. In: **IEEE international conference on systems, man and cybernetics**. IEEE, 2002. p. 478-483.
- AGÊNCIA TRANSPORTA BRASIL. Mais de cem municípios do Brasil já criaram restrição ao trânsito de caminhões. 2014. Disponível em: <<http://www.transportabrasil.com.br/2014/11/mais-de-cem-municipios-do-brasil-ja-criaram-restricao-ao-transito-de-caminhoes/>>. Acesso em: 20 junho 2019.
- ALINAGHIAN, Mahdi; SHOKOUHI, Nadia. Multi-depot multi-compartment vehicle routing problem, solved by a hybrid adaptive large neighborhood search. **Omega**, v. 76, p. 85-99, 2018.
- AMAYA, Alberto; LANGEVIN, André; TRÉPANIER, Martin. The capacitated arc routing problem with refill points. **Operations Research Letters**, v. 35, n. 1, p. 45-53, 2007.
- AMORIM, Pedro; PARRAGH, S. N.; SPERANDIO, F.; ALMADA-LOBO, B. A rich vehicle routing problem dealing with perishable food: a case study. **Top**, v. 22, n. 2, p. 489-508, 2014.
- 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.
- ASTOURES, Henrique Fiorot; DE ALVARENGA ROSA, Rodrigo; DA SILVA ROSA, André Luís. Planning the Diesel Supply for Offshore Platforms by a Mathematical Model Based on the Vehicle Routing Problem with Replenishment. **Transportation research procedia**, v. 18, p. 11-18, 2016.
- AUTODATA. Transporte de bebidas e furgões puxam alta da Truckvan. 2019. Disponível em: <<https://www.autodata.com.br/noticias/2019/07/19/transporte-de-bebidas-e-furgoes-puxam-alta-da-truckvan/29269/>>. Acesso em: 30 de novembro de 2019.
- AVELLA, Pasquale; BOCCIA, Maurizio; SFORZA, Antonio. Solving a fuel delivery problem by heuristic and exact approaches. **European Journal of operational research**, v. 152, n. 1, p. 170-179, 2004.
- AWASTHI, Anjali; ADETILOYE, Taiwo; CRAINIC, Teodor Gabriel. Collaboration partner selection for city logistics planning under municipal freight regulations. **Applied Mathematical Modelling**, v. 40, n. 1, p. 510-525, 2016.
- AZADEH, A.; FARROKHI-ASL, H. The close–open mixed multi depot vehicle routing problem considering internal and external fleet of vehicles. **Transportation Letters**, v. 11, n. 2, p. 78-92, 2019.
- BENANTAR, Abdelaziz; OUAFI, Rachid. Optimization of vehicle routes: an application to logistic and transport of the fuel distribution. In: Proc. 9th Int. **Conf. Modeling, Optim., and Simulation**. Bordeaux, França, 2012.
- BENANTAR, Abdelaziz; OUAFI, Rachid; BOUKACHOUR, Jaouad. An improved tabu search algorithm for the petrol-station replenishment problem with adjustable demands. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 58, n. 1, p. 17-37, 2020.
- BENJAMIN, Aida Mauziah; BEASLEY, J. 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.
- 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.
- BRANDÃO, Rayra; PUREZA, Vitória. DISTRIBUIÇÃO DE LATICÍNIOS COM RESTRIÇÕES DE RECARGA VIA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA. In: **XXIX Anpet**, p. 9-13, 2015.
- BROWN, Gerald G.; GRAVES, Glenn W. Real-time dispatch of petroleum tank trucks. **Management science**, v. 27, n. 1, p. 19-32, 1981.

BUHRKAL, Katja; LARSEN, Allan; ROPKE, Stefan. The waste collection vehicle routing problem with time windows in a city logistics context. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 39, p. 241-254, 2012.

CÁRDENAS, Iván; BECKERS, Joris; VANELSLANDER, Thierry. E-commerce last mile in Belgium: Developing an external cost delivery index. **Research in transportation business & management**, v. 24, p. 123-129, 2017.

CASSIDY, P. J.; BENNETT, H. S. TRAMP—a multi-depot vehicle scheduling system. **Journal of the Operational Research Society**, v. 23, n. 2, p. 151-163, 1972.

CHAJAKIS, Emmanuel D.; GUIGNARD, Monique. Scheduling deliveries in vehicles with multiple compartments. **Journal of Global Optimization**, v. 26, n. 1, p. 43-78, 2003.

CHAO, I.-Ming; GOLDEN, Bruce L.; WASIL, Edward A. A new algorithm for the site-dependent vehicle routing problem. In: **Advances in computational and stochastic optimization, logic programming, and heuristic search**. Springer, Boston, MA, 1998. p. 301-312.

CHAO, I.-Ming; GOLDEN, Bruce; WASIL, Edward. A computational study of a new heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 37, n. 3, p. 319-336, 1999.

CHEN, Dongxu; YANG, Zhongzhen. Multiple depots vehicle routing problem in the context of total urban traffic equilibrium. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2017, 2017.

CHOWMALI, W.; SUKTO, S. A novel two-phase approach for solving the multi-compartment vehicle routing problem with a heterogeneous fleet of vehicles: a case study on fuel delivery. **Decision Science Letters**, v. 9, n. 1, p. 77-90, 2020.

CNT, Confederação Nacional do Transporte. 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/noticia/custo-logistico-consome-12-do-pib-do-brasil>>. Acesso em: 12 de setembro de 2019.

COENE, Sofie; ARNOUT, A.; SPIEKSMAN, Frits CR. On a periodic vehicle routing problem. **Journal of the Operational Research Society**, v. 61, n. 12, p. 1719-1728, 2010.

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.

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.

CORDEAU, Jean-François; LAPORTE, Gilbert. A tabu search algorithm for the site dependent vehicle routing problem with time windows. **INFOR: Information Systems and Operational Research**, v. 39, n. 3, p. 292-298, 2001.

CORDEAU, Jean-François; LAPORTE, Gilbert; MERCIER, Anne. A unified tabu search heuristic for vehicle routing problems with time windows. **Journal of the Operational research society**, v. 52, n. 8, p. 928-936, 2001.

CORDEAU, Jean-François; MAISCHBERGER, Mirko. A parallel iterated tabu search heuristic for vehicle routing problems. **Computers & Operations Research**, v. 39, n. 9, p. 2033-2050, 2012.

CORTÉS-MURCIA, David L.; PRODHON, Caroline; AFSAR, H. Murat. The electric vehicle routing problem with time windows, partial recharges and satellite customers. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 130, p. 184-206, 2019.

CRAINIC, Teodor Gabriel; RICCIARDI, Nicoletta; STORCHI, Giovanni. Advanced freight transportation systems for congested urban areas. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 12, n. 2, p. 119-137, 2004.

CREVIER, Benoit; CORDEAU, Jean-François; LAPORTE, Gilbert. The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. **European journal of operational research**, v. 176, n. 2, p. 756-773, 2007.

DE OLIVEIRA, Leise Kelli et al. Analysis of the potential demand of automated delivery stations for e-commerce deliveries in Belo Horizonte, Brazil. **Research in Transportation Economics**, v. 65, p. 34-43, 2017.

E-BIT. Webshoppers, 41. 2020. Disponível em: <<https://www.ebit.com.br/webshoppers>>. Acesso em: 15 de julho de 2020.

E-COMMERCE BRASIL. Comércio eletrônico cresce 126,9% em maio, afirma pesquisa. 2020a. Disponível em: <<https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/comercio-eletronico-cresce-1269-em-maio-afirma-pesquisa/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

E-COMMERCE BRASIL. Compras por delivery crescem 59% desde o início do isolamento, aponta Rede. 2020c. Disponível em: < <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/compras-delivery-crescem-isolamento-coronavirus/>>. Acesso em: 21 de agosto de 2020.

E-COMMERCE BRASIL. E-commerce brasileiro já ganhou 135 mil lojas desde o início da pandemia. 2020b. Disponível em: < <https://www.ecommercebrasil.com.br/noticias/e-commerce-brasileiro-ganhou-135-mil-lojas-coronavirus/>>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

EL FALLAHI, Abdellah; PRINS, Christian; CALVO, Roberto Wolfler. A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 35, n. 5, p. 1725-1741, 2008.

ERDELIC, Tomislav et al. Electric vehicle routing problem with single or multiple recharges. **Transp. Res. Procedia**, v. 40, p. 217-224, 2019.

ERDOĞAN, Sevgi; MILLER-HOOKS, Elise. A green vehicle routing problem. **Transportation research part E: logistics and transportation review**, v. 48, n. 1, p. 100-114, 2012.

ESHTEHADI, Reza; DEMIR, Emrah; HUANG, Yuan. Solving the vehicle routing problem with multi-compartment vehicles for city logistics. **Computers & Operations Research**, v. 115, p. 104859, 2020.

EUROPEAN COMMISSION. "Energy, Transport and GHG Emissions—Trends to 2050". EC Directorate-Generals for Energy, Climate Action, and Mobility and Transport. 2016. Disponível em: <http://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/20160713%20draft_publication_REF2016_v13.pdf>. Acesso em: 29 de setembro de 2019.

GHIANI, Gianpaolo; IMPROTA, Gennaro; LAPORTE, Gilbert. The capacitated arc routing problem with intermediate facilities. **Networks: An International Journal**, v. 37, n. 3, p. 134-143, 2001.

GILLETT, Billy E.; JOHNSON, Jerry G. Multi-terminal vehicle-dispatch algorithm. **Omega**, v. 4, n. 6, p. 711-718, 1976.

GOOGLE. Google my maps. 2020. Disponível em:<<https://www.google.com.br/maps/preview>>. Acesso em: 22 agosto 2020.

HEMMELMAYR, Vera et al. A heuristic solution method for node routing based solid waste collection problems. **Journal of Heuristics**, v. 19, n. 2, p. 129-156, 2013.

HENKE, Tino; SPERANZA, M. Grazia; WÄSCHER, Gerhard. The multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. **European Journal of Operational Research**, v. 246, n. 3, p. 730-743, 2015.

HIERMANN, Gerhard et al. The electric fleet size and mix vehicle routing problem with time windows and recharging stations. **European Journal of Operational Research**, v. 252, n. 3, p. 995-1018, 2016.

HÜBNER, Alexander; OSTERMEIER, Manuel. A multi-compartment vehicle routing problem with loading and unloading costs. **Transportation Science**, v. 53, n. 1, p. 282-300, 2019.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Dados Socioeconômicos de Vitória-ES. 2019. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/vitoria/panorama>>. Acesso em: 20 de agosto de 2020.

IBM. IBM ILOG CPLEX Optimization Studio 12.8. 2019. Using logical constraints. Disponível em: <<https://www.ibm.com/support/pages/cplex-optimization-studio-v128>>. Acesso em: 20 de novembro de 2019.

JOERSS, Martin; NEUHAUS, Florian; SCHRÖDER, Jürgen. How customer demands are reshaping last-mile delivery. **Retrieved February**, v. 1, p. 2018, 2016.

KAABACHI, Islem et al. Measuring and evaluating hybrid metaheuristics for solving the multi-compartment vehicle routing problem. **Measurement**, v. 141, p. 407-419, 2019.

KESKIN, Merve; LAPORTE, Gilbert; ÇATAY, Bülent. Electric vehicle routing problem with time-dependent waiting times at recharging stations. **Computers & Operations Research**, v. 107, p. 77-94, 2019.

KIM, Byung-In; KIM, Seongbae; SAHOO, Surya. Waste collection vehicle routing problem with time windows. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 12, p. 3624-3642, 2006.

KOÇ, Çağrı et al. The electric vehicle routing problem with shared charging stations. **International Transactions in Operational Research**, v. 26, n. 4, p. 1211-1243, 2019.

KOCH, Henriette; HENKE, Tino; WÄSCHER, Gerhard. A genetic algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. **Working Paper Series**, 2016.

KULKARNI, R. V.; BHAVE, Pramod R. Integer programming formulations of vehicle routing problems. **European journal of operational research**, v. 20, n. 1, p. 58-67, 1985.

LAHYANI, Rahma et al. A multi-compartment vehicle routing problem arising in the collection of olive oil in Tunisia. **Omega**, v. 51, p. 1-10, 2015.

LAPORTE, Gilbert. Optimal solutions to capacitated multidepot vehicle routing problems. **Congressus Nemerantium**, v. 4, p. 283-292, 1984.

LEE, Chungmok. An exact algorithm for the electric-vehicle routing problem with nonlinear charging time. **Journal of the Operational Research Society**, p. 1-24, 2020.

LI, Jian; LI, Yang; PARDALOS, Panos M. Multi-depot vehicle routing problem with time windows under shared depot resources. **Journal of Combinatorial Optimization**, v. 31, n. 2, p. 515-532, 2016.

LI, Yongbo; SOLEIMANI, Hamed; ZOHAL, Mostafa. An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 227, p. 1161-1172, 2019.

LIN, Canhong et al. Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. **Expert systems with applications**, v. 41, n. 4, p. 1118-1138, 2014.

LISBOA, FABRÍCIO DA SILVEIRA. **GRASP PARA O PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM MULTI-COMPARTIMENTOS E RESTRIÇÃO DE JANELA DE TEMPO**. 2007. Tese de Doutorado. Universidade Estadual do Norte Fluminense.

LOWE, Richard; RIGBY, Mike. The last mile: Exploring the online purchasing and delivery journey. **Barclays**, September 2014.

MENG, Ming; MA, Yun. Route Optimization of Electric Vehicle considering Soft Time Windows and Two Ways of Power Replenishment. **Advances in Operations Research**, v. 2020, 2020.

MOFID-NAKHAEI, Elham; BARZINPOUR, Farnaz. A multi-compartment capacitated arc routing problem with intermediate facilities for solid waste collection using hybrid adaptive large neighborhood search and whale algorithm. **Waste Management & Research**, v. 37, n. 1, p. 38-47, 2019.

MONTOYA, Alejandro et al. The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 103, p. 87-110, 2017.

MONTOYA-TORRES, Jairo R. et al. A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots. **Computers & Industrial Engineering**, v. 79, p. 115-129, 2015.

MUYLDERMANS, Luc; PANG, Gu. On the benefits of co-collection: Experiments with a multi-compartment vehicle routing algorithm. **European Journal of Operational Research**, v. 206, n. 1, p. 93-103, 2010.

NACCACHE, Salma; CÔTÉ, Jean-François; COELHO, Leandro C. The multi-pickup and delivery problem with time windows. **European Journal of Operational Research**, v. 269, n. 1, p. 353-362, 2018.

NAG, Barindra; GOLDEN, Bruce L.; ASSAD, Arjang. Vehicle routing with site dependencies. **Vehicle routing: Methods and studies**, p. 149-159, 1988.

NAUTIC EXPO. Design software / for ships – STEEL. 2017. Disponível em: <<http://www.nauticexpo.com/prod/napa/product-31393-261688.html>>. Acesso em: 05 de dezembro de 2019.

PERRIER, Nathalie; LANGEVIN, André; CAMPBELL, James F. A survey of models and algorithms for winter road maintenance. Part IV: Vehicle routing and fleet sizing for plowing and snow disposal. **Computers & Operations Research**, v. 34, n. 1, p. 258-294, 2007.

PESSOA, Artur; SADYKOV, Ruslan; UCHOA, Eduardo. Enhanced branch-cut-and-price algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 270, n. 2, p. 530-543, 2018.

PESSOA, Artur; SADYKOV, Ruslan; UCHOA, Eduardo. Enhanced branch-cut-and-price algorithm for heterogeneous fleet vehicle routing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 270, n. 2, p. 530-543, 2018.

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

POLACEK, Michael et al. A variable neighborhood search for the capacitated arc routing problem with intermediate facilities. **Journal of Heuristics**, v. 14, n. 5, p. 405-423, 2008.

POLACEK, Michael et al. A variable neighborhood search for the multi depot vehicle routing problem with time windows. **Journal of heuristics**, v. 10, n. 6, p. 613-627, 2004.

PÓVOA, Carlos Leonardo Ramos; NOGUEIRA, R. T.; PAULA JUNIOR, G. G. Heurística GRASP para o problema do roteamento de veículos com Multi-Compartimentos e sua integração com o sistema de Informação Geográfica GEO-ROTA. **Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, VIII**, 2005.

PRESCOTT-GAGNON, Eric; DESAULNIERS, Guy; ROUSSEAU, Louis-Martin. Heuristics for an oil delivery vehicle routing problem. **Flexible Services and Manufacturing Journal**, v. 26, n. 4, p. 516-539, 2014.

RAMOS, Tânia Rodrigues Pereira; GOMES, Maria Isabel; BARBOSA-POVOA, Ana Paula. A new matheuristic approach for the multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes. **OR Spectrum**, v. 42, n. 1, p. 75-110, 2020.

REED, Martin; YIANNAKOU, Alik; EVERING, Roxanne. An ant colony algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem. **Applied Soft Computing**, v. 15, p. 169-176, 2014.

RENAUD, Jacques; LAPORTE, Gilbert; BOCTOR, Fayez F. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 23, n. 3, p. 229-235, 1996.

SALAZAR-AGUILAR, M. Angélica; LANGEVIN, André; LAPORTE, Gilbert. The synchronized arc and node routing problem: Application to road marking. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 7, p. 1708-1715, 2013.

SALHI, Said; IMRAN, Arif; WASSAN, Niaz A. The multi-depot vehicle routing problem with heterogeneous vehicle fleet: Formulation and a variable neighborhood search implementation. **Computers & Operations Research**, v. 52, p. 315-325, 2014.

SAMSUDDIN, Sherylaidah; OTHMAN, Mohd Shahizan; YUSUF, Lizawati Mi. Utilizing Ant Colony Optimization and Intelligent Water Drop for Solving Multi Depot Vehicle Routing Problem. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2020. p. 012095.

SANTANA, Renata Arantes et al. Planning the distribution of goods in the context of city logistics considering split deliveries with access and time restrictions. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 28, n. 4, p. 507-527, 2017.

SCHIFFER, Maximilian et al. Vehicle routing and location routing with intermediate stops: A review. **Transportation Science**, v. 53, n. 2, p. 319-343, 2019.

SCHIFFER, Maximilian; SCHNEIDER, Michael; LAPORTE, Gilbert. Designing sustainable mid-haul logistics networks with intra-route multi-resource facilities. **European Journal of Operational Research**, v. 265, n. 2, p. 517-532, 2018.

SCHIFFER, Maximilian; WALTHER, Grit. An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. **Transportation Science**, v. 52, n. 2, p. 331-352, 2017.

SCHNEIDER, Michael; STENGER, Andreas; GOEKE, Dominik. The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. **Transportation Science**, v. 48, n. 4, p. 500-520, 2014.

SCHNEIDER, Michael; STENGER, Andreas; HOF, Julian. An adaptive VNS algorithm for vehicle routing problems with intermediate stops. **Or Spectrum**, v. 37, n. 2, p. 353-387, 2015.

SHI, Yanjun et al. A Heuristic Solution Method for Multi-Depot Vehicle Routing-Based Waste Collection Problems. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2403, 2020.

SHI, Yanjun et al. A Heuristic Solution Method for Multi-Depot Vehicle Routing-Based Waste Collection Problems. **Applied Sciences**, v. 10, n. 7, p. 2403, 2020.

SICILIA, J. A.; QUEMADA, C.; ROYO, B.; ESCUÍN, D. An optimization algorithm for solving the rich vehicle routing problem based on Variable Neighborhood Search and Tabu Search metaheuristics. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 291, p. 468-477, 2016.

SILVESTRIN, Paulo Vitor; RITT, Marcus. An iterated tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 81, p. 192-202, 2017.

SOCIAL MINER. O que mudou no comportamento do consumidor. 2020. Disponível em: <<https://conteudo.socialminer.com/dados-coronavirus-comportamento-do-consumidor>>. Acesso em: 21 de agosto de 2020.

STODOLA, Petr. Hybrid ant colony optimization algorithm applied to the multi-depot vehicle routing problem. **Natural Computing**, p. 1-13, 2020.

STODOLA, Petr. Using metaheuristics on the multi-depot vehicle routing problem with modified optimization criterion. **Algorithms**, v. 11, n. 5, p. 74, 2018.

TARANTILIS, Christos D.; ZACHARIADIS, Emmanouil E.; KIRANOUDIS, Chris T. A hybrid guided local search for the vehicle-routing problem with intermediate replenishment facilities. **INFORMS Journal on Computing**, v. 20, n. 1, p. 154-168, 2008.

TASAR, Bahar; TÜRSEL ELIYI, Deniz; KANDILLER, Levent. Vehicle Routing with Compartments Under Product Incompatibility Constraints. **Promet-Traffic&Transportation**, v. 31, n. 1, p. 25-36, 2019.

UNITED NATIONS. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision. Disponível em: <<https://esa.un.org/unpd/wup/publications/files/wup2014-highlights.pdf>>. Acesso em: 25 de outubro de 2019.

WREN, Anthony; HOLLIDAY, Alan. Computer scheduling of vehicles from one or more depots to a number of delivery points. **Journal of the Operational Research Society**, v. 23, n. 3, p. 333-344, 1972.

YAHYAOU, Hiba et al. Two metaheuristic approaches for solving the multi-compartment vehicle routing problem. **Operational Research**, p. 1-24, 2018.

YU, Bin; YANG, Z. Z.; XIE, J. X. A parallel improved ant colony optimization for multi-depot vehicle routing problem. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 1, p. 183-188, 2011.

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

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

ZHANG, Ying et al. A generalized multi-depot vehicle routing problem with replenishment based on LocalSolver. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 6, n. 1, p. 81-98, 2015.

ZHANG, Ying et al. A generalized multi-depot vehicle routing problem with replenishment based on LocalSolver. **International Journal of Industrial Engineering Computations**, v. 6, n. 1, p. 81-98, 2015.

ZHEN, Lu et al. Multi-depot multi-trip vehicle routing problem with time windows and release dates. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 135, p. 101866, 2020.