



**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA
COMPUTAÇÃO**



José Weliton de Vasconcelos Filho

**Um Método para a Roteirização de Veículos em Regiões com
Restrições de Circulação**

**Mossoró - RN
2018**

José Weliton de Vasconcelos Filho

Um Método para a Roteirização de Veículos em Regiões com Restrições de Circulação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação - associação ampla entre a Universidade do Estado do Rio Grande do Norte e a Universidade Federal Rural do Semi-Árido, para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof^o Dario José Aloise, DSc.

Coorientador: Prof^o Dmontier Pinheiro Aragão Junior, DSc.

**Mossoró - RN
2018**

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

Vm Vasconcelos Filho, José Weliton de.
Um Método para a Roteirização de Veículos em
Regiões com Restrições de Circulação / José Weliton
de Vasconcelos Filho. - 2018.
63 f. : il.

Orientador: Dario José de Aloise.
Coorientador: Dmontier Pinheiro Aragão Junior.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Ciência da Computação, 2018.

1. Problema de Roteamento de Veículos. 2.
Restrições de Tráfego. 3. Logística Urbana. 4. VNS.
5. GRASP. I. Aloise, Dario José de , orient. II.
Pinheiro Aragão Junior, Dmontier, co-orient. III.
Título.

JOSE WELITON DE VASCONCELOS FILHO

Um Método para a Roteirização de Veículos em Regiões com Restrições de Circulação

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

APROVADA EM: 30 / 05 / 2018



Prof. Dr. Dario José Aloise
Orientador e Presidente



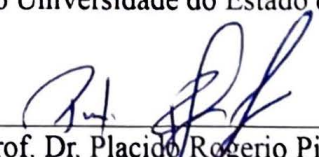
Prof. Dr. Dmontier Pinheiro Aragão Junior
Coorientador Universidade Federal do Ceará



Prof. Dr. Carlos Heitor Pereira Liberalino
Examinador Interno - Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Prof. Dr. Francisco Chagas de Lima Júnior
Examinador Interno Universidade do Estado do Rio Grande do Norte



Prof. Dr. Plácido Rogerio Pinheiro
Examinador Externo Universidade de Fortaleza - UNIFOR



Prof. Dr. Antônio Clecio Fontelles Thomaz
Examinador Externo Universidade Estadual do Ceará

Dedico este trabalho a minha mãe, guerreira que criou três filhos sozinha e sempre incentivou/apoiou os filhos estudarem para buscar um futuro melhor. Obrigado mãe, Te amo muito!

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, por sempre guiar meu caminho, por nunca ter deixado me faltar nada e, principalmente, por sempre me dar forças pra continuar. A minha mãe, Luciene, por ter me incentivado a estudar, a correr atrás dos meus objetivos, por ter me amado e educado, devo tudo a você mãe.

Sou muito grato ao meu amigo, professor e orientador Prof. Dr. Dario José Aloise, por ter me apoiado em algumas decisões difíceis durante o mestrado. Além disso, pela paciência, confiança, conselhos, orientação e acompanhamento que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional. Também deixo meus sinceros agradecimentos ao meu coorientador e grande amigo Prof. Dr. Dmontier Pinheiro Aragão Junior por me aconselhar, por ser paciente, por esclarecer minhas dúvidas tanto na área acadêmica quanto na profissional. Sem o apoio de vocês dois, eu não chegaria tão longe.

Fazendo as palavras de Robson as minhas, sou extremamente grato aos meus grandes parceiros não só de Mestrado, mas agora também de vida - Jefferson, Moraes Neto, Paul e Robson. Obrigado por terem feito meu mestrado melhor e mais fácil de aguentar, por terem me aguentado reclamar das disciplinas e por terem compartilhado noites de lazer, bebendo aquela cervejinha, e noites de trabalho pesado passadas em claro estudando dentro do laboratório enquanto Mosssoró caía em festa. Obrigado por serem amigos de verdade.

Meu sincero obrigado ao meu grande amigo de longa data Ramiro, que desde a graduação me apoia e me ajuda no que for preciso. Obrigado por ser um verdadeiro amigo, espero poder retribuir como você merece e saiba que pode contar comigo. Meu obrigado também aos meus amigos e aos professores que fazem parte do PPgCC. Em especial, ao Prof. Dr. Paulo Gabriel Gadelha Queiroz por ter me incentivado, orientado e compreendido desde a graduação.

Obrigado também a minha noiva e futura esposa, Bruniele, por estar sempre me apoiando, principalmente nas decisões difíceis, por ter compreendido que eu iria ficar longe por um tempo para buscar um futuro melhor e por ser meu suporte nos momentos difíceis da vida.

À CAPES pelo apoio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa.

Muito obrigado a todos que direta ou indiretamente contribuíram em minha formação acadêmica.

"Our doubts are traitors, and make us lose
the good we oft might win, by fearing to attempt"
William Shakespeare

RESUMO

As restrições de tráfego de caminhões em centros urbanos estão sendo cada vez mais adotadas para tentar reduzir os níveis de congestionamentos. Com isso, empresas distribuidoras necessitam criar rotas otimizadas para atender a demanda dos seus clientes, mas respeitando as restrições de circulação de veículos. Este trabalho tem como objetivo propor um método para roteirização de veículos em regiões com restrições de circulação. Por se tratar de um problema NP-difícil, métodos exatos demandam tempos computacionais não aceitáveis em problemas envolvendo muitos clientes, i.e., problemas reais. Assim sendo, o método proposto utiliza, separadamente as meta-heurísticas Busca em Vizinhança Variável (VNS) e Procedimento de Busca Guloso, Aleatório e Adaptativo (GRASP) para encontrar rotas sub-ótimas, eventualmente ótimas para os veículos. Foram desenvolvidos e comparados quatro algoritmos, usando a meta-heurísticas VNS e GRASP; sendo ambas aplicadas uma vez com dependência de tempo e outra vez com clusterização. Como validação, este trabalho utilizou os dados de uma distribuidora real da cidade de São Paulo, a partir destes foram criadas 27 instâncias para a realização dos experimentos nas cidades de Fortaleza, Recife e São Paulo. Essas cidades foram escolhidas por possuírem restrições de circulação. Os resultados obtidos mostram que o método é capaz de lidar com diferentes cenários de roteirização, alcançando um bom resultado para as meta-heurísticas VNS e GRASP.

Palavras-chave: Problema de Roteamento de Veículos, Restrições de Tráfego, Logística Urbana, Meta-Heurísticas VNS e GRASP.

ABSTRACT

Traffic restrictions for trucks in urban centers are increasingly being adopted to try to reduce congestion levels. With this, distribution companies need to create routes optimized to meet the demand of their customers, but respecting the restrictions of traffic of vehicles. This work aims to propose a method for vehicle routing in regions with traffic restrictions. Because it is an NP-difficult problem, exact methods require unacceptable computational times in problems involving many clients, i.e. actual problems. Thus, the proposed method uses, separately, the Variable Neighborhood Search (VNS) and the Greedy Randomized Adaptive Search Procedure (GRASP) metaheuristics to find sub-optimal routes, which may be optimal for vehicles. Four algorithms were developed and compared using the VNS and GRASP metaheuristics; both being applied once with time dependence and again with clustering. As validation, this work used the data of a real distributor of the city of São Paulo, from these were created 27 instances for the accomplishment of the experiments in the cities of Fortaleza, Recife and São Paulo. These cities were chosen because they have traffic restrictions. The results show that the method is able to handle different routing scenarios, achieving a good result for the VNS and GRASP metaheuristics.

Key-words: Vehicle Routing Problem, Traffic Restrictions, City Logistics, VNS and GRASP metaheuristics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa das restrições ao trânsito de caminhões em SP.	17
Figura 2 – Exemplo de Solução para o VRP.	23
Figura 3 – Distribuição do tempo de viagem.	26
Figura 4 – Situações de distâncias calculadas para o TDVRP.	27
Figura 5 – Ilustração do conceito de economias.	31
Figura 6 – Ilustração da estratégia 2-opt.	32
Figura 7 – Ilustração da estratégia 3-opt.	32
Figura 8 – Realocação de Clientes.	34
Figura 9 – Troca de Clientes.	35
Figura 10 – Fluxograma da meta-heurística GRASP.	37
Figura 11 – Influência do alfa na LRC do GRASP.	37
Figura 12 – Fluxograma do método proposto.	40
Figura 13 – Ajuste do mapa no cenário restrito em SP	42
Figura 14 – Distribuição log-normal da demanda dos clientes das Instâncias de teste	45
Figura 15 – Execução do algoritmo GRASP0 para dois clientes que simulam os pontos 2 e 3 da Figura 4	53
Figura 16 – Execução do algoritmo VNS1 para dois clientes que simulam os pontos 2 e 3 da Figura 4	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo dos trabalhos relacionados	28
Tabela 2 – Quantidade de veículos em cada instância de teste	45
Tabela 3 – Distribuição das Instâncias de Teste	46
Tabela 4 – Diferenciação dos algoritmos por abordagem	48
Tabela 5 – Distância Total (m)	51
Tabela 6 – Tempo Total (h)	52
Tabela 7 – Quantidade de Rotas	54
Tabela 8 – Tempo de execução (s)	55

LISTA DE ALGORITMOS

1	VND	33
2	VNS-VND	36
3	GRASP	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMC Autarquia de Trânsito e Cidadania de Fortaleza

AVRP Asymmetric Vehicle Routing Problem

B&B Branch-and-bound

CET Companhia de Engenharia de Tráfego

CNH Carteira Nacional de Habilitação

CTTU Companhia de Trânsito e Transporte Urbano

CVRP Capacited Vehicle Routing Problem

CW Clarke e Wright

FIRJAN Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro

GB Gigabyte

GHz Gigahertz

GRASP Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

HVRP Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem

h horas

HD Hard Disk

IDE Integrated Development Environment

JEE Java Platform, Enterprise Edition

m metros

LC Lista de Candidatos

LRC Lista Restrita de Candidatos

PCR Plano de Trânsito da Prefeitura do Recife

RAM Random Access Memory

s segundos

SA Simulated Annealing

SDVRP Site Dependent Vehicle Routing Problem

SP São Paulo

TDVRP Time-Dependent Vehicle Routing Problem

TDVRPTW Time Dependent Vehicle Routing Problem with Time Windows

TSP Travelling Salesman Problem

VER Vias Estruturais Restritas

VND Variable Neighborhood Descent

VNS Variable Neighborhood Search

VRP Vehicle Routing Problem

VRPTW Vehicle Routing Problem with Time Windows

VUC Veículo Urbano de Carga

ZMRC Zona de Máxima Restrição de Circulação

ZERC Zona Especial de Restrição de Circulação

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Definição do Problema	18
1.2	Objetivos	19
1.2.1	Objetivo Geral	19
1.2.2	Objetivos Específicos	20
1.3	Metodologia	20
2	TRABALHOS RELACIONADOS	22
2.1	Problema de Roteamento de Veículos Capacitado	22
2.2	Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea	24
2.3	Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo	24
2.4	Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Área	25
2.5	Problema de Roteamento de Veículos Dependente de Tempo	25
3	ALGORITMOS PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA	29
3.1	Algoritmos Exatos	29
3.2	Heurísticas	30
3.2.1	Algoritmo das economias: Clark e Wright	30
3.2.2	Melhorias 2-OPT e 3-OPT	31
3.3	Meta-Heurísticas	32
3.3.1	VNS	33
3.3.2	GRASP	36
4	MÉTODO PROPOSTO	40
4.1	Identificação das Vias Restritas	40
4.2	Agrupar Áreas de Restrições	41
4.3	Ajuste dos Mapas	41
4.4	Definição dos Clientes	42
4.5	Cálculo das Matrizes de Custos	42
4.6	Execução do Algoritmo	43
5	EXPERIMENTOS	44
5.1	Instâncias	44
5.2	Algoritmos utilizados	47
6	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	50

7	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS . .	57
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da população nos centros urbanos e sem a melhoria adequada da infraestrutura urbana e de transporte, o problema de mobilidade urbana, termo que geralmente se refere as circunstâncias em que ocorre o deslocamento de pessoas e cargas nos espaços urbanos (KNEIB, 2012), se agrava cada vez mais, tornando o trânsito um grande incômodo para os habitantes. No Brasil, a falta de transporte público de qualidade, faz com que aumente o uso de modos individuais de transporte. Com isso, vários carros se aglomeram em vias que não tem uma infraestrutura adequada e criam congestionamentos. Esses congestionamentos causam diferentes problemas, como estresse, poluição, acidentes e prejuízos. Sendo considerados um dos problemas mais representativos do trânsito urbano e um influenciador dos custos de viagem (LONG; SZETO; HUANG, 2014). Esses custos podem chegar a R\$ 120 bilhões em 2022, somente em São Paulo (SP)- Brasil (FIRJAN, 2014). Para tentar amenizar esse problema, os governantes estão adotando diferentes políticas públicas, tais como:

- Pedágio: taxa cobrada para a circulação de veículos em determinados locais;
- Rodízio de carros: Proíbe a circulação de veículos em horários e locais definidos. Geralmente é baseado no final da placa do carro e gera uma infração de trânsito para quem circular nos locais e horários proibidos;
- Faixas exclusivas para ônibus e ciclovias: com o intuito de incentivar o uso e o transporte público e melhorá-lo, foram criadas várias vias de uso exclusivo de ônibus. As ciclovias visam estimular o uso de bicicletas para locomoção diminuindo os congestionamentos e estimulando a prática de atividades físicas;
- Restrições de tráfegos de determinados veículos e as restrições de carga e descarga: semelhante ao rodízio de carros, no qual proíbe a circulação de caminhões em horários e locais definidos ou proíbe a carga e descarga de mercadorias.

Em SP são adotadas todas as políticas públicas citadas anteriormente. Na Figura 1, pode-se notar as áreas e vias que possuem restrição ao trânsito de caminhões, as principais são (CETSP, 2017):

- Mini Anel Viário: Área com rodizio de placas, na qual determina a proibição de circulação nos dias da semanas no período da manhã das 7 às 10 h e no período da tarde das 17 às 20 h. A proibição de circulação atinge automóveis e caminhões, dependendo da placa do carro e do dia da semana;

Figura 1 – Mapa das restrições ao trânsito de caminhões em SP.



Fonte: CETSP (2017).

- As vias da Zona de Máxima Restrição de Circulação - ZMRC: foi implantada pela primeira vez em 1986 e atualmente abrange uma área com cerca de 100 Km². Possui restrição ao trânsito de caminhões de 2^a a 6^a feira das 5h às 21h e aos sábados das 10h às 14h, exceto feriados;
- A Zona Especial de Restrição de Circulação - ZERC: é uma área ou via em Zonas Exclusivamente Residenciais - ZER, a fim de promover condições de segurança e/ou qualidade ambiental. Possuem sinalização específica com restrição por período integral;
- As Vias Estruturais Restritas - VER: importantes avenidas estruturais que fazem importantes ligações entre regiões da cidade. As restrições ao trânsito de caminhões são de 2^a a 6^a feira das 5h às 21h, aos sábados das 10h às 14h, exceto feriados.

Na Figura 1, a zona maior, na qual compreende a parte sombreada mais clara e quase toda as outras áreas destacadas, é a área de rodízio do Mini Anel Viário. A zona sombreada mais escura é a ZMRC e as vias com a cor verde são as VER.

Apesar dos grandes congestionamentos, as cidades precisam permitir os deslocamentos de pessoas, o abastecimento de mercadorias e a prestação de serviços. Para fazer o abastecimento de mercadorias as transportadoras utilizam-se de caminhões, isto aumenta o fluxo de caminhões de cargas, que representam 25% do tráfego das vias em uma cidade (DABLANC, 2007).

Em geral, o fluxo dos transportes de carga se inicia com a coleta de pedidos feita pelos vendedores e seguem uma periodicidade, variada de acordo com a empresa. Depois, é feita a entrega dos pedidos. muitas vezes, essas entregas são realizadas por

empresas especializadas em atividades de transporte de cargas que precisam gerenciar de forma adequada seus recursos mais importantes, frota e pessoal, para não perderem eficiência e competitividade. Para isto, estas empresas necessitam gerar rotas que atendam a todas as restrições envolvidas.

Logo, as empresas devem empregar novos métodos para a geração das rotas. Para esta finalidade, é preciso utilizar-se de heurísticas, as quais são técnicas que não garantem a melhor solução, mas que retornam bons resultados em tempo computacional aceitável, quando comparado ao tempo de execução de outras técnicas que geram a solução ótima. Percebe-se que, uma das principais limitações que restringem a adoção das técnicas que retornam soluções ótimas é o tempo computacional que, normalmente, é muito alto e, portanto, inviável. A utilização de heurísticas permite o tratamento das restrições que caracterizam os problemas deste tipo, como: tamanho e tipo da frota, capacidade dos veículos, jornada de trabalho, restrição de circulação, dentre outras questões relevantes na criação das rotas (ARAGÃO JUNIOR, 2014). Quanto maior o número de restrições maior será a complexidade do problema a ser tratado.

Assim, neste trabalho é proposto um método para roteirização de veículos em regiões com restrições de circulação. Além disso, duas estratégias meta-heurísticas, VNS e GRASP, foram propostas. A análise das estratégias propostas nesta dissertação considera o contexto de uma indústria distribuidora de mercadorias, na qual as rotas geradas para a entrega de mercadorias devem respeitar as restrições de circulação de caminhões da região em que circulam.

1.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

As restrições de tráfego de caminhões estabelecem áreas com acesso restrito que dependem, normalmente, do peso, altura e largura do caminhão nas áreas centrais. Além disso, existem regulamentos rígidos para rotas de caminhões urbanos. De acordo com (MUÑUZURI et al., 2012), as restrições de tráfego aos caminhões combatem, teoricamente, dois problemas: níveis de poluição e o bloqueio de ruas estreitas.

Apesar das restrições surgirem como uma solução paliativa para as cidades, as mesmas são um problema para as transportadoras que precisam de uma logística para criar rotas eficientes para atender a demanda dos seus clientes. Além de diminuir o custo das rotas, as empresas precisam evitar que caminhões entrem em áreas restritas, em São Paulo, esta infração é punida com uma multa no valor de R\$ 85,13, com acréscimo de quatro pontos na Carteira Nacional de Habilitação - CNH (CETSP, 2017), o que aumenta o custo de uma rota em caso de infração.

As características do problema tratado nesta dissertação são:

- Clientes com localização e demandas previamente conhecida;
- Janela de tempo rígida dos clientes e do expediente de trabalho dos veículos. Na qual a entrega das cargas, demanda dos clientes, deve respeitar tanto o horário da janela dos clientes quanto o expediente de trabalho dos veículos;
- Frota Heterogênea de veículos, geralmente caminhões. Nos quais possuem diferentes tipos, capacidades e custos associados;
- Custos de viagens variáveis e assimétricos: O custo entre dois pontos, cliente ou centro de distribuição, depende do horário do dia. No problema abordado, os custos variam com os horários de restrições para determinado tipo de caminhão, o que aumenta a complexidade do problema;
- Cada cliente deve ser visitado apenas uma vez e por um único veículo;
- Todas as rotas iniciam e terminam no centro de distribuição;
- A capacidade do caminhão não pode ser superada pelo somatório da demanda dos clientes que estão na rota;
- Além da capacidade, o volume e a quantidade máxima de clientes atendidos por cada veículo devem ser respeitados;
- A janela de tempo para a pausa do almoço deve ser respeitada.

Neste trabalho é apresentado um método para resolver o problema e também é apresentado algoritmos desenvolvidos baseados em heurísticas conhecidas na literatura. O método com os algoritmos, é avaliado em diferentes cenários, utilizando diferentes quantidade de pedidos e diferentes restrições de circulação. Essas restrições são reais e foram obtidas na legislação atual de três cidades do Brasil - Fortaleza, Recife e São Paulo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método para a roteirização de veículos em regiões com restrições de circulação.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Identificar o Estado da Arte para roteirização de veículos em regiões com restrições de circulação;
- Implementar meta-heurísticas para a estratégia de dependência de tempo;
- Implementar meta-heurísticas para a estratégia de clusterização;
- Propor um método para a roteirização de veículos em regiões com restrições de circulação;
- Propor instâncias para validar o método proposto;
- Comparar, através do método, as estratégias desenvolvidas.

1.3 METODOLOGIA

A pesquisa aplicada foi utilizada para o desenvolvimento da dissertação que, de acordo com a natureza, tem como objetivo gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos (SILVA; MENEZES, 2001). Por outro lado, esta pesquisa pode também ser classificada como exploratória, pois visa proporcionar maior familiaridade com o problema e com objetivo de torná-lo mais claro ou a propor hipóteses.

A forma de abordagem é considerada quantitativa, por levar em consideração apenas variáveis que possam ser mensuradas, traduzindo os testes em números e informações para classificá-las e analisá-las. Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, foram realizados uma Pesquisa bibliográfica, elaborada a partir de materiais já publicados, e uma Pesquisa Experimental.

Esta dissertação está estruturada em 7 (sete) capítulos, o Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre diferentes versões do Problema de Roteamento de Veículos (VRP - da sigla em inglês *Vehicle Routing Problem*) e uma revisão detalhada sobre trabalhos relacionados ao Problema de Roteamento de Veículos com Restrições de Área (SDVRP - da sigla em inglês *Site Dependent Vehicle Routing Problem*) e ao Problema de Roteamento de Veículos Dependente de Tempo (TDVRP - da sigla em inglês *Time-Dependent Vehicle Routing Problem*). O Capítulo 3 métodos de solução para o PRV são descritos, assim como as meta-heurísticas proposta são detalhadas. No Capítulo 4 são descritas as etapas do método proposto. Os experimentos computacionais são descritos no Capítulo 5.

O Capítulo 6 descreve as análises e discussões dos resultados obtidos nos experimentos, no qual compara a execução das instâncias nos algoritmos propostos, incluídos no método. Finalmente, as Conclusões e Recomendações (Capítulo 7) trazem as principais considerações obtidas a partir dos resultados deste trabalho.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo é apresentado uma revisão bibliográfica sobre diferentes versões do VRP e uma revisão mais detalhada dos trabalhos relacionados ao SDVRP e ao TDVRP. A seção 2.1 apresenta o Problema de Roteamento de Veículos Capacitado o (CVRP - da sigla em inglês *Capacitated Vehicle Routing Problem*). Uma breve introdução do Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (HVRP - da sigla em inglês *Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem*) é apresentado na Seção 2.2 e também é apresentado uma breve introdução do o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (VRPTW - da sigla em inglês *Vehicle Routing Problem with Time Windows*) na Seção 2.3. Por fim, na Seção 2.4 e na Seção 2.5 são apresentadas a revisão para o SDVRP e para o TDVRP respectivamente.

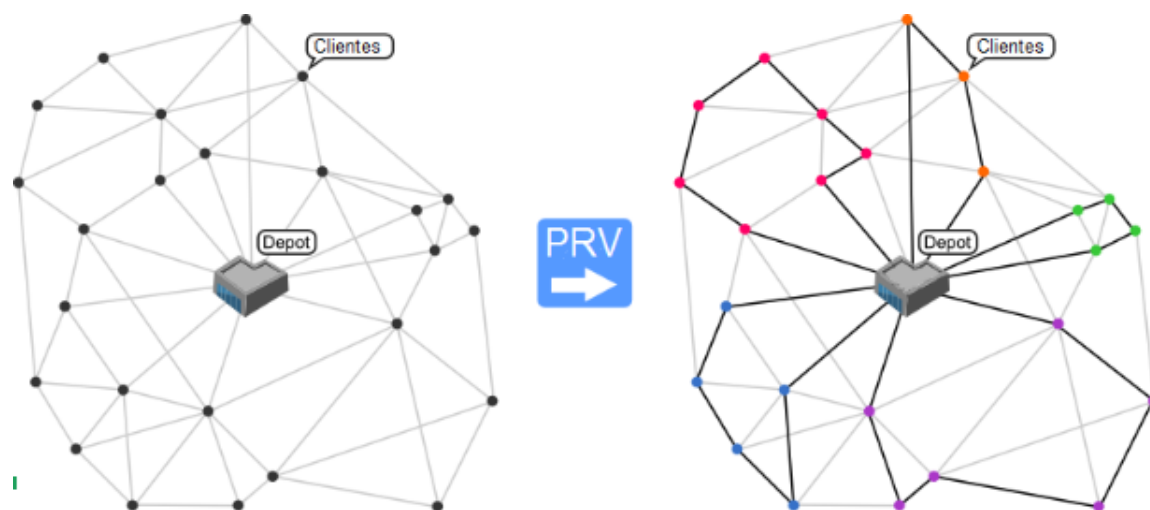
2.1 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS CAPACITADO

O VRP foi introduzido por Dantzig e Ramser (1959) e é amplamente abordado na literatura, devido aos altos gastos com transporte de carga representarem uma parte considerável do preço dos produtos. Além do aumento dos custos, o abastecimento de mercadorias nas grandes cidades aumenta os congestionamentos e, como efeito secundário, aumenta a poluição atmosférica e sonora. O estudo do VRP ajuda a reduzir o custo do produto final e a diminuir a poluição. A redução deste custo significa o aumento do lucro e, conseqüentemente, torna as empresas mais competitivas em um mercado cada vez mais competitivo. Uma outra motivação considerada é a complexidade do problema. Por se tratar de um problema NP-Difícil (LENSTRA; KAN, 1981), métodos exatos demandam tempos computacionais não aceitáveis do ponto de vista da utilização na prática. Contudo, a maioria dos problemas abordados na literatura são mais simples que os problemas do mundo real.

O VRP é uma extensão do Problema do Caixeiro Viajante (TSP - da sigla em inglês *Travel Salesman Problem*), a diferença é que o TSP tem como objetivo atender um determinado número de pontos e fazer um ciclo hamiltoniano, ou seja, uma única rota, enquanto que no VRP existe a possibilidade de ter várias rotas. O VRP consiste em gerar rotas com base na frota de veículos para atender a demanda de um conjunto de clientes partindo e retornando ao depósito, com o objetivo de minimizar o custo total, definido pelo somatório dos custos das rotas. Desde de sua introdução, o VRP vem se destacando

pela grande variedade de problemas que derivam dele, tais como: a otimização das rotas de ônibus e caminhões pipas, entrega postal, entrega de produtos alimentícios e de utilidade doméstica, a distribuição de produtos para centros atacadistas e outros.

Figura 2 – Exemplo de Solução para o VRP.



Fonte: Adaptado de NEO (2013).

O PRV pode ser representado por um grafo $G = (V, A)$. No qual V é o conjunto de vértices, os clientes, v_0 é o depósito e A é o conjunto de arestas que representam os caminhos entre os clientes. Cada aresta (i, j) , sendo i diferente de j , tem um custo c_{ij} associado. Quando o custo c_{ij} é igual ao c_{ji} o problema é dito simétrico. Um exemplo de representação e solução do PRV em um grafo pode ser visto na Figura 2.

O CVRP é a variante mais simples do VRP, na qual todos os clientes possuem demanda conhecida e devem ser atendidas integralmente pelos veículos da frota. Além disso, a frota é homogênea, ou seja, todos os veículos são semelhantes e partem de um único depósito. A principal restrição imposta nessa versão, como o nome já diz, é a de capacidade. Essa restrição define que a capacidade do caminhão não pode ser superada pelo somatório da capacidade dos clientes que estão na rota (FISHER; JAIKUMAR, 1981).

O CVRP consiste em encontrar até K rotas, na qual K é a quantidade de veículos semelhantes que partem de um depósito com capacidade C , de modo a minimizar o custo total e satisfazer as restrições:

- Cada cliente é visitado apenas uma vez e por um único veículo.
- Todas as rotas iniciam e terminam no mesmo depósito.
- A capacidade do caminhão não pode ser superada pelo somatório da capacidade dos clientes que estão na rota.

Além dessas restrições, existe as entradas previamente conhecidas, na qual, dependem da versão do VRP. Para o CVRP são conhecidas:

- A localização do depósito.
- Os clientes e suas respectivas demandas.
- A quantidade de veículos semelhantes e a capacidade C .

2.2 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM FROTA HETEROGÊNEA

A partir do HVRP, foi modificado as características dos veículos para se aproximar mais ainda de casos reais. Na qual, os veículos deixam de ter capacidades semelhantes e passam a ter capacidades específicas. Além disso, pode se definir outras características, como tipo, velocidade, custos variáveis e outras. Nesta versão, a quantidade de veículos de cada tipo é dada como entrada. Nesta variante, conhecida como Problema de Roteamento de Veículos com Frota Heterogênea (HVRP), as restrições continuam as mesmas do CVRP, mas devendo-se levar em conta que cada veículo tem capacidade diferente.

2.3 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM JANELA DE TEMPO

Uma outra extensão do CVRP, o VRPTW, foi gerada a partir da modificação das características dos clientes, na qual cada cliente tem um intervalo de tempo $[a_i, b_i]$ em que algum veículo deve começar a atendê-lo, ou seja, cada cliente tem um limite que obriga algum veículo a atendê-lo depois de a_i e antes de b_i . Essa restrição de tempo gera um aumento na complexidade do VRP, pois se o veículo chegar no cliente i antes do tempo a_i , abertura da janela, ele terá que esperar, gerando um aumento no custo do atendimento, da mesma forma se o veículo chegar no cliente i após b_i , fim da janela, é atribuído uma penalidade para a rota. No mundo real, empresas têm início e fim de expediente que devem ser respeitados pelos fornecedores.

Existem algumas variações de acordo com a janela de tempo, mas as mais comuns são as janelas fortes e as flexíveis. Nas janelas fortes a janela de tempo tem que ser respeitada a todo custo, ao contrário das flexíveis que as janelas de tempo podem ser violadas mediante uma penalidade que cresce na medida que a visita se afasta da janela.

2.4 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS COM RESTRIÇÕES DE ÁREA

Muitas cidades têm implementado restrições para trânsito de determinados veículos em regiões da cidade (geralmente veículos maiores, mais poluentes ou de carga), essas regiões são conhecidas como Zonas de Baixa Emissão de Carbono, Zona de Máxima Restrição de Circulação, Zona Especial com Restrição a Circulação, dentre outros nomes. Essas restrições surgiram como um desafio para roteirização e ainda não tem muitos estudos que tratem a regulamentação de trânsito (KIM et al., 2015).

O principal desafio da roteirização neste cenário é fazer o planejamento das rotas considerando janelas de tempo de acesso para as zonas restritas de uma cidade. Esse tipo de janela difere da janela encontrada no VRPTW, pois a janela de tempo está relacionada à zona restrita, impedindo determinados tipos de veículos de circular dentro dela. Devido essa característica específica, otimizar a roteirização de veículos geralmente vem sendo associado ao SDVRP. Além dessa abordagem, o TDVRP é comumente associada ao contexto urbano.

A maioria dos trabalhos que aborda o SDVRP utilizam-se da estratégia de clusterização, na qual os clientes são agrupados de acordo com os tipos de veículos permitidos, ou seja, os clientes de cada agrupamento vão ser atendidos pelo mesmo tipo de veículo. Em seguida, as rotas são geradas por meio de execução do modelo do VRP básico (CHAO; GOLDEN; WASIL, 1999; CHAO; LIOU, 2005; FRANCESCHETTI et al., 2017), percebe-se que o SDVRP é resolvido em duas ou mais etapas, dependendo da quantidade de clusters criados. Apesar dessa abordagem simplificar o processo de roteirização, ela pode resultar em soluções ruins. Uma estratégia para evitar a execução por clusters foi abordada no trabalho de Zare-Reisabadi e Mirmohammadi (2015), na qual adiciona um custo elevado para clientes que não podem ser atendidos por determinado veículo.

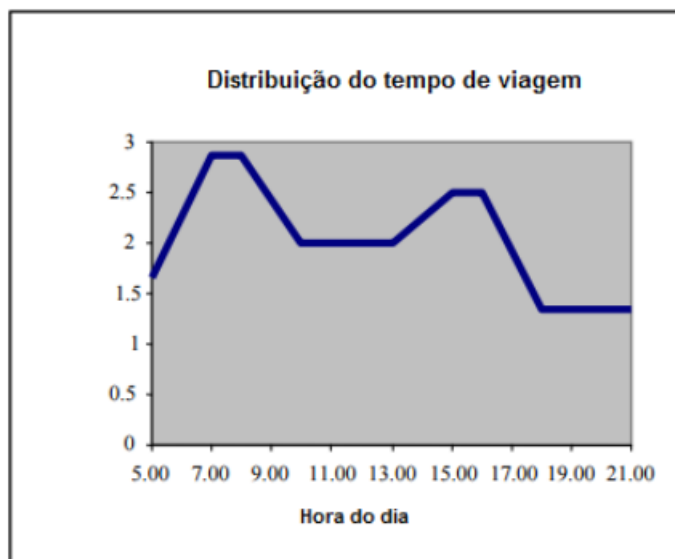
2.5 PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DEPENDENTE DE TEMPO

O PRVDT foi introduzido por Malandraki e Daskin (1992) e consiste em criar rotas otimizadas quando o tempo de viagem entre dois clientes ou um cliente e o depósito não dependem somente da distância, mas dependem também da hora do dia. Além disso, tem como principais objetivos diminuir o número de rotas e diminuir o número total do tempo de viagem das rotas.

Esta variante do VRP Clássico foi motivada pelo fato de que no contexto urbano, os congestionamentos modificam o tempo de viagem e desempenham um papel fundamental para a realização de uma rota mais realista. Usualmente, o VRP considera

o custo de viagem entre dois pontos, clientes ou depósito, como fixo. Um exemplo da variação do tempo de viagem de acordo com o horário do dia pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Distribuição do tempo de viagem.

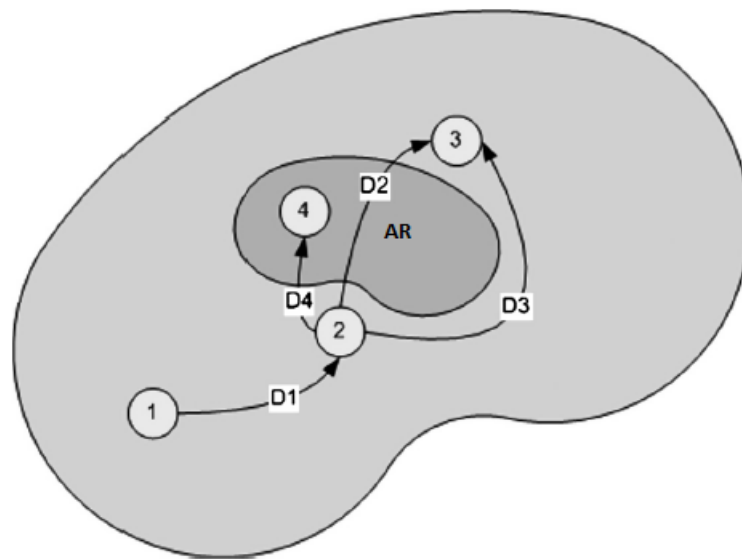


Fonte: Adaptado de Donati et al. (2008).

O TDVRP é bem estudado na literatura, porém, de acordo com Afshar-Nadjafi, B. e Afshar-Nadjafi, A. (2017), sua variante com janela de tempo (TDVRPTW - da sigla em inglês *TDVRP with Time Windows*) tem métodos de soluções escassas na literatura. No trabalho de Soler, Albiach e MartíNez (2009) o TDVRPTW é resolvido otimamente com instâncias com poucos clientes por meio da transformação do TDVRPTW no Problema de Roteamento de Veículos Assimétrico (AVRP - da sigla em inglês *Asymmetric VRP*) em que o custo de um cliente i para outro cliente j é diferente do custo de j para i , além de possuir uma frota homogênea de veículos. Balseiro, Loiseau e Ramonet (2011) apresentam um sistema híbrido baseado na meta-heurística Colônia de Formigas com heurística de inserção para o TDVRPTW. Figliozzi (2012) apresenta um algoritmo iterativo com três fases para resolver o TDVRPTW e propôs novas instâncias com variações de velocidade típicas de congestionamentos urbanos para o TDVRPTW. O trabalho de Kritzinger et al. (2012) resolveu o problema com a meta-heurística VNS. Afshar-Nadjafi, B. e Afshar-Nadjafi, A. (2016) resolveram o Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos, Frota Heterogênea, Dependente de Tempo, sujeito a janela de tempo forte e restrições de trânsito com a meta-heurística *Simulated Annealing* (SA). Afshar-Nadjafi, B. e Afshar-Nadjafi, A. (2017) apresentam uma heurística construtiva para Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos, Frota Heterogênea e Dependente de Tempo.

A Figura 3 mostra as situações que necessitam calcular as distâncias entre dois pontos para o TDVRP. A distância entre os pontos 1 e 2 (ambos fora da área restrita)

Figura 4 – Situações de distâncias calculadas para o TDVRP.



Fonte: Adaptado de Muñuzuri et al. (2012).

é D1. A distância entre os pontos 2 e 3 é D2 e D3, dependendo do veículo restrito. Finalmente, a distância entre os pontos 2 e 4 é D4.

Além das estratégias de clusterização e dependência de tempo, foram encontradas outras abordagens que roteirizam com restrições de área. Cattaruzza et al. (2014) utiliza múltiplas viagens com veículos pequenos para atender aos clientes. Gerdessen (1996), Lin, Vincent e Chou (2009), Lin, Vincent e Chou (2010), Lin, Vincent e Lu (2011), Belenguer et al. (2015) e Parragh e Cordeau (2017) utilizam caminhões com trailer. Em situações na qual alguns clientes não podem ser atendidos com trailer, essa abordagem requer um local para desacoplar o trailer. Alguns trabalhos fazem roteirizações de dois níveis e, semelhante a clusterização feita no SDVRP, utilizam-se de um segundo nível de instalações e diferentes frotas de veículos para evitar a presença de veículos grandes no centro da cidade Crainic, Ricciardi e Storch (2009), Crainic et al. (2012), Amaral e Aghezzaf (2015), Soysal, Bloemhof-Ruwaard e Bektaş (2015), Gianessi et al. (2016) e Afshar-Nadjafi, B. e Afshar-Nadjafi, A. (2016). Já o trabalho de Muñuzuri et al. (2013) apresentam um comparativo do custo extra que as restrições causam, tratando o problema como uma grande janela de tempo para os clientes dentro da zona restrita, na qual permite atender os clientes para roteirização somente quando a janela de tempo permitir que o veículo possa entrar na zona e também apresentou uma comparação da abordagem proposta com a abordagem do TDVRP e VRPTW.

O método proposto neste trabalho é baseado na TDVRP, contudo difere-se por verificar o ponto de partida e o de chegada, verificando se neste intervalo o veículo passa em alguma zona restrita no tempo proibido. A vantagem da abordagem de

dependência de tempo sobre a de clusterização e as demais é o tratamento da distancia do ponto 2 ao 3 da Figura 4, calculando a distancia D2 e D3, dependendo do veículo restrito e do horário de acesso da área restrita. Além disso remove a quebra de violações comentadas no trabalho de Muñuzuri et al. (2013).

Neste trabalho, será realizado uma aplicação utilizando o problema com dependência de tempo, janela de atendimento e frota heterogênea. Sendo que, a variação do tempo da viagem vai depender da restrição aplicada ao caminhão que está fazendo a rota atual e do horário em que essa restrição é aplicada. Neste caso, os veículos com restrição devem contornar as áreas de restrição no horário em que eles não podem circular, ou seja, no horário em que a restrição é aplicada. Além disso, neste trabalho é tratado a janela de tempo dos veículos e a janela de tempo para pausa do almoço.

De forma comparativa, a Tabela 1 mostra as características abordadas neste trabalho e os pontos abordados nos trabalhos encontrados na literatura. Nota-se que os trabalhos encontrados na literatura não se preocupam com a pausa para almoço de uma rota. Além disso, apesar de que alguns trabalhos abordarem a dependência de tempo, o foco destes não é no tempo das restrições de circulação e sim no horário de maior circulação de veículos.

Tabela 1 – Comparativo dos trabalhos relacionados

Trabalho	Janela de Tempo	Frota Heterogênea	Restrições por área	Dependente de Tempo	Almoço
Este Trabalho	X	X	X	X	X
(CHAO; GOLDEN; WASIL, 1999)		X	X		
(CHAO; LIOU, 2005)		X	X		
(CRAINIC; RICCIARDI; STORCHI, 2009)	X		X		
(SOLER; ALBIACH; MARTÍNEZ, 2009)	X	X		X	
(BALSEIRO; LOISEAU; RAMONET, 2011)	X	X		X	
(MUÑUZURI et al., 2013)			X	X	
(KRITZINGER et al., 2012)	X	X		X	
(CRAINIC et al., 2012)			X		
(CATTARUZZA et al., 2014)			X		
(BELENGUER et al., 2015)		X	X		
(AMARAL; AGHEZZAF, 2015)	X		X	X	
(SOYSAL; BLOEMHOF-RUWAARD; BEKTAŞ, 2015)			X	X	
(ZARE-REISABADI; MIRMOHAMMADI, 2015)	X	X	X		
(GIANESSI et al., 2016)			X		
(PARRAGH; CORDEAU, 2017)	X	X	X		
(AFSHAR-NADJAFI; AFSHAR-NADJAFI, 2017)	X		X	X	

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3 ALGORITMOS PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA

Como dito anteriormente, o VRP é um problema bastante abordado na literatura. Devido a isso, surgiram diversos algoritmos para solucioná-lo. Nesta seção, apresenta-se de maneira sucinta alguns algoritmos conhecidos na literatura para solucionar o VRP e suas variantes. Basicamente, existem dois tipos de procedimentos metodológicos para resolver o problema: exatos e aproximativos. Os algoritmos exatos garantem a obtenção da solução ótima, mas com grande consumo de tempo computacional enquanto que os aproximativos não garantem solução ótima mas garantem uma solução aproximada em um menor tempo computacional. Na Seção 3.1 é feita uma introdução de métodos exatos. Na Seção 3.2 a heurística construtiva das economias e as heurísticas de refinamento 2-opt e 3-opt são introduzidas. Na Seção 3.3 são apresentadas as meta-heurísticas VNS e GRASP implementadas neste trabalho.

3.1 ALGORITMOS EXATOS

Apesar da dificuldade em solucionar o VRP, devido sua complexidade, existem algoritmos que verificam todas as soluções possíveis até encontrar a melhor delas. Apesar dos algoritmos exatos conseguirem encontrar a solução ótima, o elevado tempo computacional não permite, em tempo hábil, que resolva problemas grandes (ARAGÃO JUNIOR, 2014).

O algoritmo proposto por Land e Doig (1960) e utilizado para o VRP por Fisher (1994) e outros, o ramificar e limitar (ou B&B da sigla em inglês de *branch-and-bound*) é um algoritmo para encontrar soluções ótimas de vários problemas de otimização. De forma resumida, é feito uma enumeração sistemática de todas as soluções candidata à ótima em uma árvore e depois é feito um corte dos nós subproblemas até chegar na solução final por meio dos limites superiores e inferiores, utilizando a estratégia de dividir para conquistar.

Na fase processamento ou fase *bounding*, é feito uma relaxação do problema para fazer o cálculo dos limites inferiores e superiores e, após o cálculo, os limites são aplicados na instância de entrada. Se os limites forem iguais o algoritmo termina, caso contrário faz-se uma ramificação, também conhecido como *branching*, onde ocorre o particionamento do problema em dois ou mais subproblemas. Na fase de ramificação,

é selecionado e processado um subproblema candidato. Na qual existem quatro possibilidades:

- Se a solução for viável e melhor do que a solução atual, substitui-se a atual pela nova solução e continua-se o processamento do algoritmo.
- Se ao subproblema não tiver solução, descarta-se o mesmo. Também conhecido como *pruning* ou poda do nó da árvore.
- Caso contrário, comparados os limites inferiores do subproblema com o limite superior global, melhor solução viável encontrada até o momento. Se for maior ou igual, então o nó também pode ser podado.
- Se não for possível podar o subproblema, é feita a ramificação e adicionado os filhos dos subproblemas a lista de soluções candidatos. Este processo é repetido até a lista de candidatos à solução ficar vazia. Neste caso, a solução atual é a solução ótima.

3.2 HEURÍSTICAS

Os algoritmos heurísticos exploram apenas um subconjunto das soluções possíveis, retornando uma solução aproximada da ótima e de baixo custo computacional. Como desvantagem, as heurísticas têm tendência de ficarem presas em uma solução ótima local.

Várias heurísticas foram propostas ao longo dos anos para resolver o VRP. Algumas são classificadas como heurísticas construtivas, pois constroem gradualmente uma solução, e outras como heurísticas de refinamento, que tem como objetivo melhorar a solução inicial por meio da exploração de sua vizinhança. Nesta seção apresenta-se a heurística construtivas de Clarke e Wright e as heurísticas de refinamento 2-opt e 3-opt.

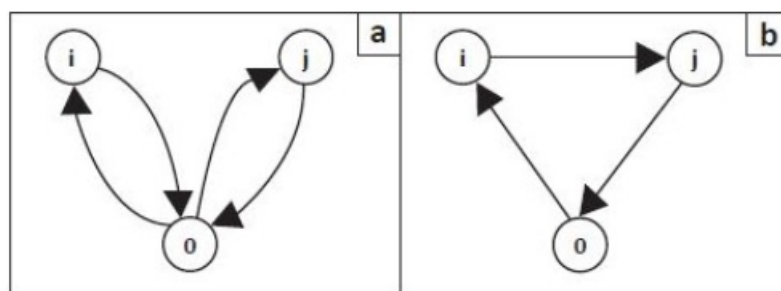
3.2.1 Algoritmo das economias: Clark e Wright

Também conhecida como heurística de Clarke e Wright (1964), é um dos algoritmos mais conhecidos para resolver o VRP. Tem como objetivo mesclar duas rotas viáveis formando uma única rota, também viável, e é considerado um algoritmo guloso por pegar a melhor economia na hora de mesclar as rotas em duas etapas simples (CLARKE; WRIGHT, 1964).

- Criar uma rota para cada cliente, na qual é constituída pelo centro de distribuição e um cliente.

- Mesclar rotas com a maior economia por meio de um processo. Para acontecer a junção de duas rotas que contenham os clientes i e j , eles devem estar ou na primeira ou na última posição de suas respectivas rotas e a demanda total das rotas unidas não deve extrapolar a capacidade do veículo. A cada iteração, as combinações possíveis das rotas são analisadas através da fórmula $S_{ij} = C_{i0} + C_{0j} - C_{ij}$. Sendo, C_{i0} e C_{0j} representantes da distância entre o armazém e os clientes i e j , respectivamente, e C_{ij} a distância entre os dois clientes. S_{ij} representa a economia da combinação das rotas. Logo, quanto maior for a economia, maiores serão as chances das rotas com os clientes i e j serem mescladas. Pode-se visualizar o conceito de economias na Figura 5, na qual duas rotas são mescladas é uma economizando o custo $i0 + 0j - ij$.

Figura 5 – Ilustração do conceito de economias.



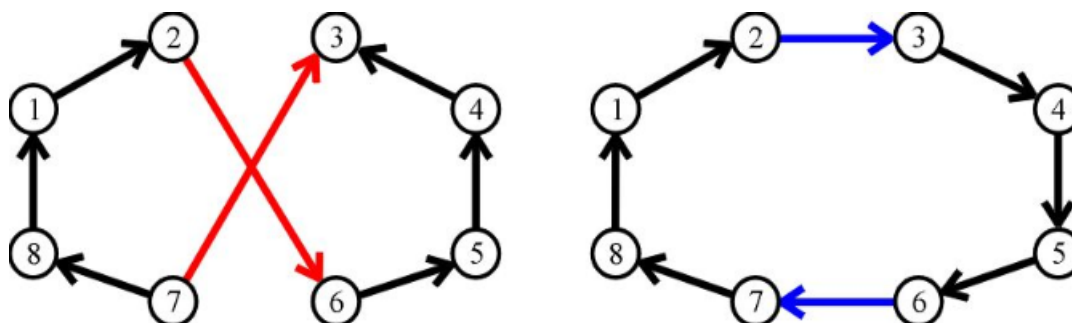
Fonte: Struwig, Ruthven e Leipzig (2013).

3.2.2 Melhorias 2-OPT e 3-OPT

O 2-opt foi introduzido por Croes (1958) para resolver o TSP e também pode ser utilizado para resolver o VRP. Além disso, é um procedimento intra-rota que tenta melhorar uma solução inicial por meio da eliminação de duas arestas não consecutivas de uma rota. Em seguida, duas novas arestas são inseridas de forma cruzada, na mesma rota, reconectando a rota, com o objetivo de encontrar a sequência de visitas com menor custo, mantendo a viabilidade da rota. Pode-se observar a estratégia utilizada na heurística 2-opt na Figura 6.

De modo similar ao 2-opt, o método 3-opt, introduzido por Lin (1965), realiza permutações com três arestas de uma rota, pode-se observar as permutações na Figura 7, o 3-opt requer mais tempo computacional que o 2-opt. Além desses, o k-opt (para $k > 3$) consegue alcançar resultados ainda melhores, mas o custo computacional pode ser proibitivo, dependendo do tamanho do problema (LIN; KERNIGHAN, 1973).

Figura 6 – Ilustração da estratégia 2-opt.

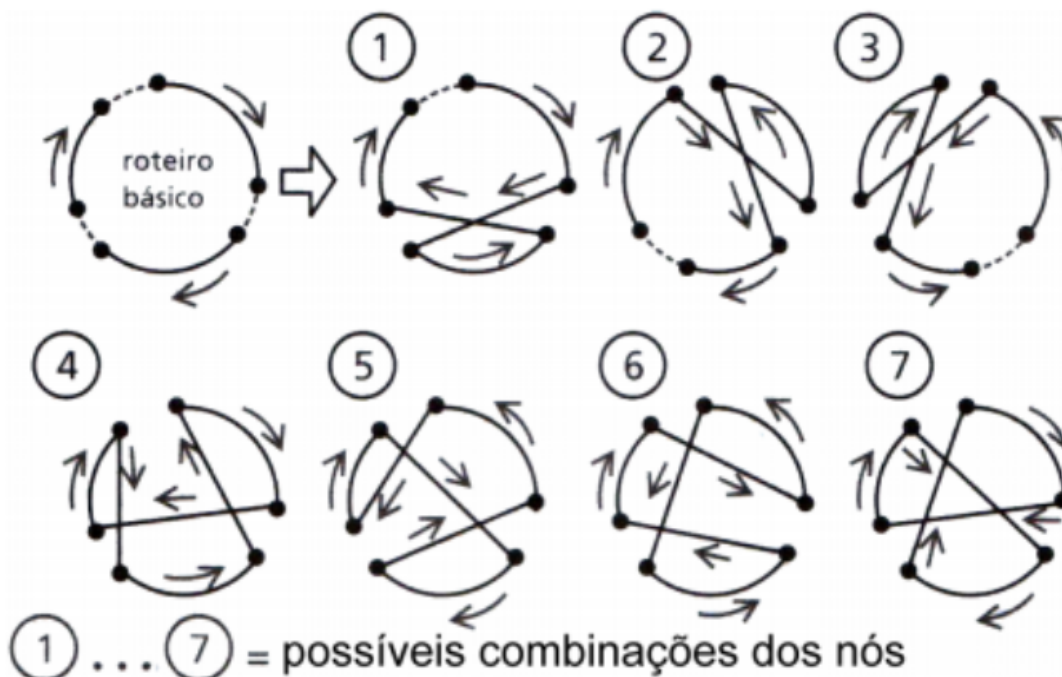


Fonte: Stephens (2007).

3.3 META-HEURÍSTICAS

As meta-heurísticas, assim como as heurísticas, exploram apenas uma parte do espaço de soluções. Contudo, apesar de não garantirem uma solução ótima, apresentam uma estratégia de escapar de ótimos locais. Devido a essa estratégia, que permite encontrar, eventualmente, o ótimo para instâncias do problema em tempo hábil, as meta-heurísticas passaram a ser um dos principais meios para resolver problemas mais complexos, sobretudo problemas combinatórios NP-difíceis, como o VRP.

Figura 7 – Ilustração da estratégia 3-opt.



Fonte: Novaes (2016).

Várias meta-heurísticas têm surgido com mais intensidade a partir dos anos 90. Dentre as principais, pode-se destacar: Busca Tabu, Algoritmos Genéticos, Arre-

fecimento Simulado (SA - da sigla em inglês de *Simulated Annealing*), Redes Neurais, Procedimento de Busca Guloso, Aleatório e Adaptativo (GRASP - da sigla em inglês de *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) e Busca em Vizinhança Variável (VNS - da sigla em inglês de *Variable Neighborhood Search*). Neste trabalho foram utilizados as meta-heurísticas VNS e GRASP e, devido a isso, serão abordados a seguir.

Algoritmo 1: VND

Entrada: s
Saída: s

```

1  início
2       $s' \leftarrow s$ ;
3       $k \leftarrow 1$ ; // vizinhança atual
4       $r \leftarrow 2$ ; // número de vizinhanças
5      enquanto  $k \leq r$  faça
6           $s' \leftarrow \text{vizinhanca}(k)$ ;
7          se  $f(s') < f(s)$  então
8               $s \leftarrow s'$ ;
9               $k \leftarrow 1$ ;
10         fim
11     senão
12          $k \leftarrow k + 1$ ;
13     fim
14 fim
15 retorne  $s$ ;
16 fim
17
```

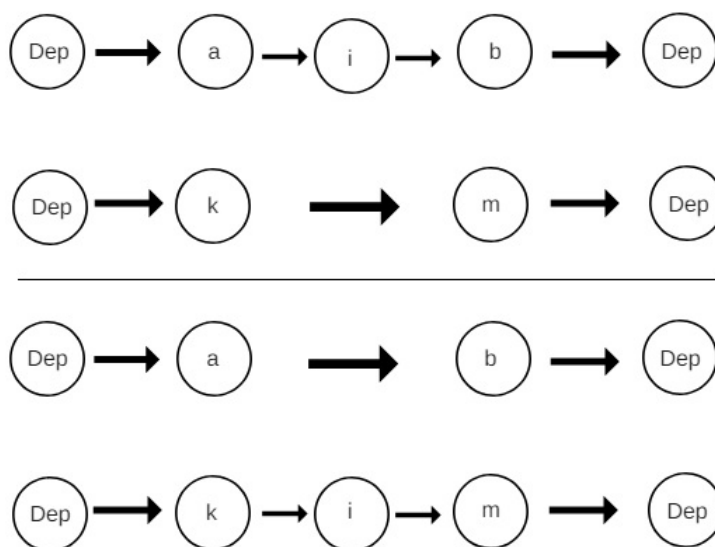
3.3.1 VNS

A meta-heurística VNS, introduzida por Mladenovic e Hansen (1997) é uma evolução da Método de Descida em Vizinhança Variável (VND - da sigla em inglês de *Variable Neighborhood Descent*). O VND utiliza uma estrutura de vizinhança enquanto for possível melhorar a solução atual, caso contrario a meta-heurística troca de vizinhança. O VNS constitui um método de busca local que agita a vizinhança da solução atual de forma sistemática, com o objetivo de fugir dos ótimos locais, e atualizar a solução corrente. Após a agitação, é executado uma busca local para intensificar as buscas na vizinhança atual. A solução é atualizada se uma melhoria for encontrada, caso contrário uma nova vizinhança é gerada e o procedimento de busca local é aplicado novamente. Este processo se repete até que a condição de parada seja satisfeita, pode-se

citar como exemplo de parada a quantidade de iterações ou tempo de execução. Neste trabalho implementa-se uma variante da VNS, conhecida como VNS-VND, que utiliza a VND como procedimento de busca local. Pode-se visualizar o pseudocódigo do VND no Algoritmo 1. Também, a meta-heurística VNS recebe uma solução inicial para o problema. Para tanto, será utilizada a heurística de Clarke e Wright (CW) para gerar a solução inicial com algumas adaptações, que permitam criar rotas para uma frota heterogênea sem quebrar as restrições impostas pelo problema. Basicamente, esta adaptação fará a verificação do número de rotas já mescladas para verificar se excede o número de caminhões com determinada capacidade. Além disso, este algoritmo também verificará as restrições da quantidade de clientes na rota, jornada de trabalho e pausa para o almoço de cada veículo.

Foram definidas duas agitações para fugir do ótimo local e chegar em novas vizinhanças do VNS. A primeira é uma realocação de clientes, na qual pega um cliente aleatório de uma rota aleatória e coloca em outra rota aleatória, como pode-se observar na Figura 8.

Figura 8 – Realocação de Clientes.

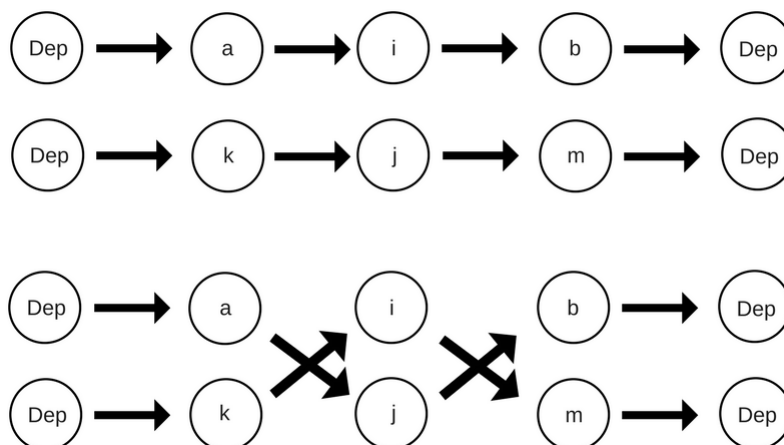


Fonte: Adaptado de Kindervater e Savelsbergh (1997).

A segunda, um pouco mais complexa, é uma troca de clientes entre rotas, assim como na primeira, os clientes e as rotas são aleatórios, pode-se visualizar um exemplo na Figura 9.

Foram criadas novas variações a partir da combinação das duas primeiras, porém os testes revelaram que não tiveram ganhos significativos, e sim um aumento no tempo de execução. Logo, estas combinações foram descartadas. Após a mudança de vizinhança, vem a fase de refinamento do VNS, que faz uma busca até atingir o ótimo local. Nesta fase, utiliza-se a meta-heurística VND na qual utiliza os métodos

Figura 9 – Troca de Clientes.



Fonte: Adaptado de Kindervater e Savelsbergh (1997).

2-opt e depois o 3-opt ambos enquanto conseguir melhorar a solução. O pseudo código

do VNS-VND pode ser visualizado no Algoritmo 2.

Algoritmo 2: VNS-VND

Entrada: matrizes, iterações

Saída: s

```

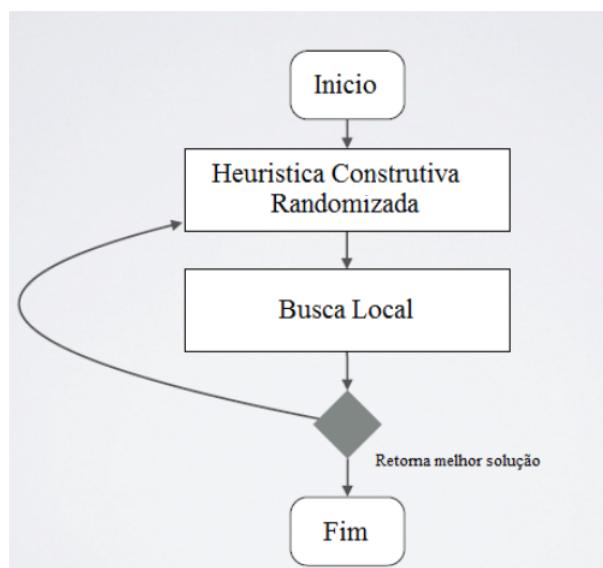
1  início
2       $s \leftarrow \text{construtorInicial}(\text{matrizes});$ 
3       $s' \leftarrow s;$ 
4       $x \leftarrow 1;$  // iteração atual
5       $r \leftarrow 2;$  // número de vizinhanças
6      enquanto  $x < \text{iterações}$  faça
7           $k \leftarrow 1;$  // vizinhança atual
8          enquanto  $k \leq r$  faça
9              selecione  $k$  faça
10                  $s' \leftarrow \text{vizinhanca}(k);$ 
11             fim
12              $s' \leftarrow \text{VND}(s');$  // busca local com VND
13             se  $f(s') < f(s)$  então
14                  $s \leftarrow s';$ 
15             fim
16             senão
17                  $k \leftarrow k + 1;$ 
18             fim
19         fim
20          $x \leftarrow x + 1;$ 
21     fim
22 fim
23 retorne s;
```

3.3.2 GRASP

A meta-heurística GRASP, introduzida por Feo e Resende (1995), combina aspectos gulosos e aleatórios na construção da solução. Além disso, é um método iterativo que consiste de duas fases, uma para criar a solução inicial e a outra para fazer uma busca local e melhorar a qualidade da solução, construção e de refinamento respectivamente. O critério de parada mais utilizado é a quantidade de iterações, nas quais são independentes. A melhor solução encontrada ao final de todas as interações

é a solução retornada como resultado do algoritmo. Pode-se visualizar o fluxograma do algoritmo da meta-heurística GRASP na Figura 10.

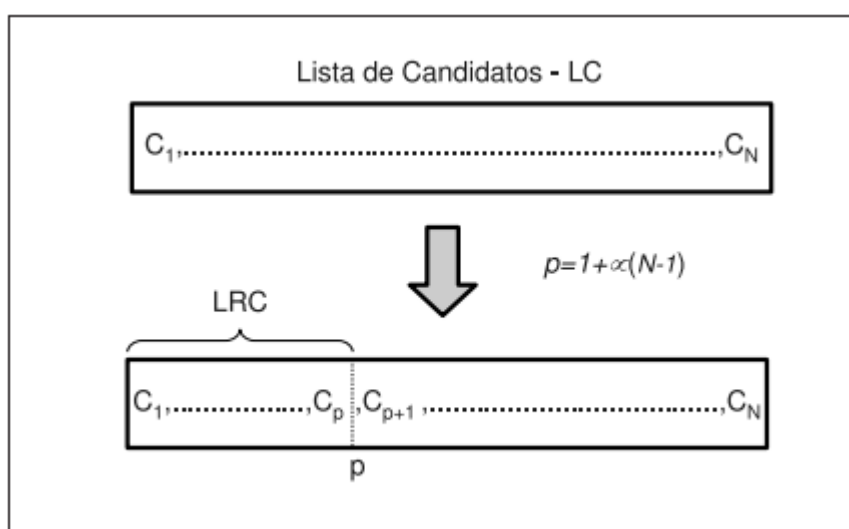
Figura 10 – Fluxograma da meta-heurística GRASP.



Fonte: Adaptado de Pillac (2013).

Apesar da solução retornada na fase de construção ser viável, dificilmente é uma solução localmente ótima ou considerada uma solução “boa”. A busca local é importante nesse aspecto, na qual melhora a solução construída. Contudo, a efetividade da busca local depende da qualidade da solução inicial, sendo que quanto melhor for a solução inicial mais rápido a busca local tende a encontrar uma boa solução. Neste trabalho implementa-se o GRASP que utiliza o 3-opt como procedimento de busca local.

Figura 11 – Influência do alfa na LRC do GRASP.



Fonte: Lima Júnior (2009).

O GRASP tem a fase construtiva, na qual a solução é construída iterativamente pela inserção de um elemento por vez. Este elemento é escolhido aleatoriamente da Lista Restrita de Candidatos (LRC), na qual tem o tamanho definido pela relação do parâmetro alfa (α) com a lista de candidatos (LC), conforme a Figura 11, utilizando-se a cardinalidade dos elementos. Neste trabalho, o valor de alfa adotado foi 0.05, o que deixa a solução tendendo a uma solução mais gulosa do que aleatória (LIMA JÚNIOR, 2009). A fase construtiva deste trabalho foi criada de forma inovadora baseada em heurísticas compostas, inicialmente constrói-se rota por rota até não ter mais elementos na LC, o critério de parada de inserção em uma rota é a capacidade do maior caminhão não utilizado ou o tempo do expediente, ou seja, enquanto não estourar a capacidade do maior caminhão não utilizado ou o tempo de expediente continua-se a inserir elementos em uma rota. A função gulosa que define a qualidade do elemento é a distância dos pontos mais próximo do centro de massa dos pontos já inseridos na rota, uma rota vazia inicia-se com o ponto da LC mais distante do centro de distribuição. Assim como as heurísticas compostas, um método de refinamento é executado na rota atual após a inserção de um elemento na mesma; a heurística de refinamento utilizada foi o 2-opt abordado na Seção 3.2.2. Além da fase construtiva, o GRASP tem a fase de busca local para aprimorar a solução anterior, para isso utilizou-se o método 3-opt também abordado na Seção 3.2.2. O pseudocódigo do GRASP pode ser visto no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: GRASP

Entrada: matrizes, iterações

Saída: s

```

1  início
2      s ← null;
3      f(s) ← +∞;
4      k ← 1;
5      enquanto k < iteracoes faça
6          s' ← gulosoAleatorio(matrizes);
7          s' ← 3opt(s');
8          se f(s') < f(s) então
9              s ← s';
10         fim
11         k ← k + 1;
12     fim
13     retorne s;
14 fim
  
```

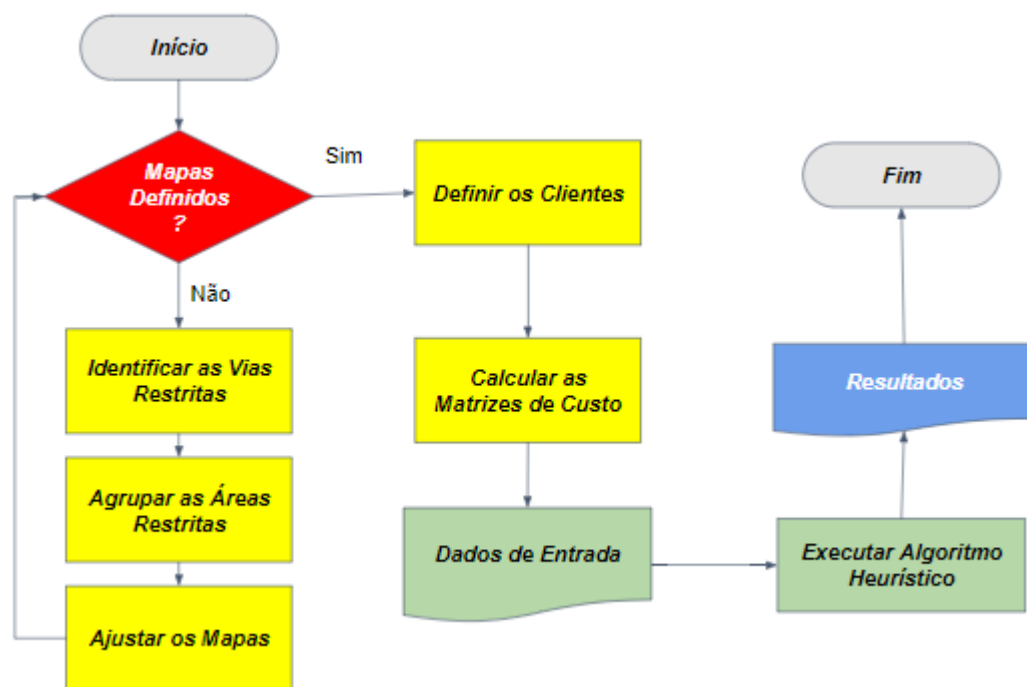
Existem algumas variações do GRASP propostas na literatura que modificam o construtor inicial. Por exemplo, o GRASP Reativo proposto por Prais e Ribeiro (2000)

utiliza um valor aleatório do parâmetro α ao invés de um valor fixo e o GRASP Learning proposto por Lima Júnior, Melo e Doria Neto (2008) utiliza o algoritmo Q-Learning de aprendizado por reforço como construtor inicial para aprender com as iterações já ocorridas.

4 MÉTODO PROPOSTO

A roteirização proposta neste trabalho não é uma atividade simples. Para facilitar sua utilização e entendimento, é proposto um método para a execução da roteirização em ambientes reais. O presente capítulo descreve as etapas de desenvolvimento do método proposto para roteirização em regiões com áreas restritas, destacando as etapas necessárias.

Figura 12 – Fluxograma do método proposto.



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 IDENTIFICAÇÃO DAS VIAS RESTRITAS

O método inicia-se com a identificação das vias com restrições na região selecionada. Para isto, deve-se fazer uma pesquisa das informações das vias restritas em sites de instituições responsáveis pela fiscalização e coordenação do trânsito da região selecionada. Como exemplo, na cidade de SP a Companhia de Engenharia de Tráfego (CETSP, 2017) contém todas as informações necessárias sobre as restrições de circulação na região de SP.

4.2 AGRUPAR ÁREAS DE RESTRIÇÕES

Definidas as vias restritas, é necessário agrupar as áreas de restrições por tipo de veículo e horário de restrição. Nesta etapa é necessário definir os tipos de caminhões utilizados para a roteirização e identificar as vias em que os mesmos não podem trafegar, agrupando-as em cenários de restrições. Continuando com o exemplo de SP, pode-se definir pelo menos dois tipos de caminhões, um como VUC (Veículo Urbano de Carga) e um como Padrão para caminhões de grande porte. Depois da definição dos tipos de caminhões, precisa-se identificar quais vias são restritas para cada tipo de veículo e agrupa-las em cenários de restrição. Após isso, precisa-se verificar qual o horário restrito para cada grupo. Em SP existem seis zonas de restrições atualmente (CETSP, 2017), baseado nessas zonas, podem ser criados três cenários de restrições: um sem restrição para veículos sem restrição, um com as restrições para o veículo Padrão e o outro com restrições para o VUC, as duas últimas com tempo integral de restrição.

4.3 AJUSTE DOS MAPAS

Após definidas as restrições dos veículos, deve-se ajustar os mapas. Esses ajustes são feitos para cada cenário, ou seja, uma mapa para cada cenário de tal forma que cada via restrita de um cenário, tenha custo elevado, tendendo ao infinito, para o tipo de veículo restrito pertencente ao cenário.

Pode-se obter os mapas por meio do OpenStreetMap (OPENSTREETMAP, 2004) de forma gratuita ou pode-se comprar com outras empresas. Além disso, pode-se utilizar o software QGIS Desktop para edição.

Para evitar que os clientes entrem nas áreas restritas, remove-se as vias restritas de cada mapa pertencente ao cenário de restrição. Logo, o custo de deslocamento de um cliente ao outro vai depender do cenário de restrição em que o veículo que atende os clientes da rota se encaixa.

A Figura 13 exibe a remoção das vias feitas na região de SP para o veículo Padrão com o software de edição QGIS Desktop. As vias pontilhadas são as vias restritas que foram removidas do mapa e as vias contínuas são as vias que não possuem restrição.

Um outro fator importante das vias, é a velocidade média. Neste trabalho, a velocidades média das vias são velocidades reais obtidas por meio do OpenStreetMap (OPENSTREETMAP, 2004).

Figura 13 – Ajuste do mapa no cenário restrito em SP



Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.4 DEFINIÇÃO DOS CLIENTES

Com os mapas modificados, deve-se definir os clientes a serem roteirizados. Os clientes devem conter as informações de demanda, tempo de serviço, cenário de restrição, se pertence a alguma área de restrição, e janela de tempo. Além disso, deve-se definir as informações de expediente do veículo, pausa para o almoço e a quantidade de veículos, com seus respectivos tipos, que serão utilizados na roteirização.

4.5 CÁLCULO DAS MATRIZES DE CUSTOS

Com os clientes e mapas definidos, deve-se calcular as matrizes de distância e tempo. Logo, para cada cenário de restrição deve-se calcular uma matriz de custo pela distância e uma matriz de custo pelo tempo. Na qual, os custos de clientes em zonas restritas ficaram elevados para o cenário que contempla a restrição.

Para o cálculo da distância e do tempo, deve-se utilizar algoritmos de caminho mínimo. Além disso, deve-se definir a velocidade média de cada via para se obter o tempo de deslocamento.

4.6 EXECUÇÃO DO ALGORITMO

Por fim, após a definição dos dados de entrada, deve-se executar a roteirização em algum algoritmo heurístico, que use a estratégia de dependência de tempo, que retorne uma solução viável. Neste trabalho, criou-se as meta-heurísticas GRASP e VNS.

5 EXPERIMENTOS

A presente seção detalha os experimentos realizados com o método, assim como a criação das instâncias, seção 5.1 e os algoritmos utilizados, seção 5.2.

5.1 INSTÂNCIAS

Para implementar e validar o método, um conjunto de instâncias de três grandes cidades brasileiras que contém restrições de circulação para caminhões (Fortaleza, Recife e São Paulo) foram criadas seguindo os passos do método proposto. As instâncias são divididas em porcentagem de clientes pertencentes aos cenários de restrição, no qual um cliente pertence ao cenário se estiver a pelo menos três quarteirões de distância das vias restritas. As porcentagens variam de 5%, 10% e 15% dos pontos de cada Instância.

Para cada cidade, foram geradas nove instâncias, sendo divididas em três grupos, de acordo com a quantidade de pontos. Um grupo com três instâncias de 50 clientes, outro com três instâncias com 100 clientes e outro com três instâncias com 150 clientes. Cada grupo contém instância com 5%, 10% ou 15% de clientes restritos. Além disso, todas as instâncias contém 10% de clientes com janela de tempo longo, 4 horas (manhã ou tarde). A distribuição das instâncias podem ser vistas na Tabela 3.

A definição dos pontos de cada grupo foi feita de maneira aleatória, na qual traçou-se um retângulo na área do mapa de cada cidade e gerou os pontos aleatoriamente dentro deste. Além disso: verificou-se a quantidade de pontos nas áreas restritas estavam de acordo com cada instância; foram feitas alterações manuais no caso dos pontos gerados conterem um número maior ou menor que a porcentagem definida. As alterações foram simplificadas o máximo possível, de tal forma que se a quantidade for maior, os pontos mais próximos das bordas da área restrita são arrastados para fora da área de restrição até atingir a porcentagem de clientes restritos por instâncias. De forma similar, se o número de clientes for menor que a porcentagem de pontos restritos os pontos mais próximos das áreas de restrição foram arrastados para dentro da área restrita. Além disso, os números foram arredondados para cima nas instâncias em que as porcentagens dão números fracionados, por exemplo 5% de 50 é 2.5 e ficou 3.

A janela de atendimento foi definida como um intervalo de 4 horas. Além disso, foi definido que cada instância contém 10% de pontos com janela de atendimento. A

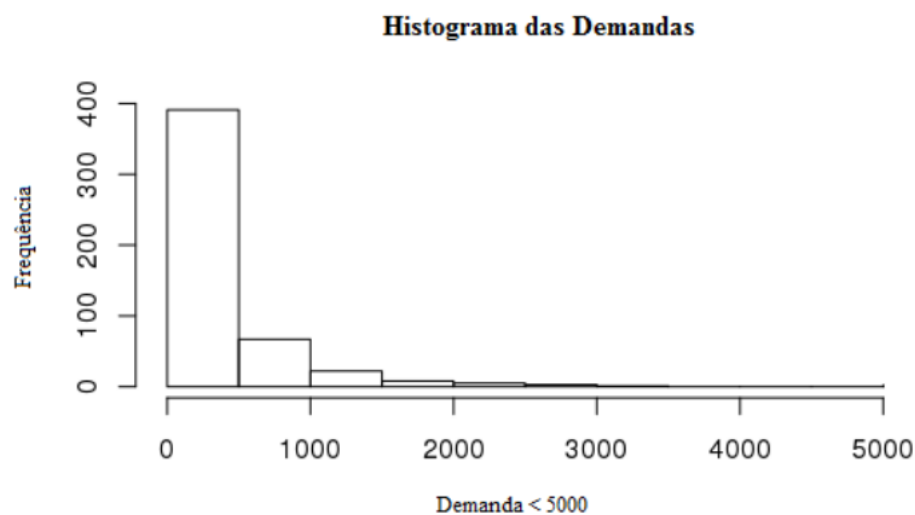
Tabela 2 – Quantidade de veículos em cada instância de teste

Veículos	Capacidade (kg)	Quantidade
Padrão	7000	10
VUC	3500	10

Fonte: Elaborado pelo Autor.

escolha dos pontos foi feita de maneira aleatória dentro do conjunto de pontos de cada instância, o período também foi definido de forma aleatória, manhã ou tarde.

Figura 14 – Distribuição log-normal da demanda dos clientes das Instâncias de teste



Fonte: Elaborado pelo Autor.

O peso demandado dos clientes foram gerados seguindo uma distribuição log-normal, essa levou em conta as demandas de 500 clientes reais de uma distribuidora de São Paulo, conforme a Figura 14. Além disso, os veículos também são baseados em dados reais da mesma distribuidora e foram definidas quantidades suficientes para atender toda a demanda dos clientes das instâncias, mais detalhes na Tabela 2. Outro parâmetro importante de cada cliente é o tempo de atendimento, o qual foi definido como um minuto, ou seja, quase instantâneo.

As matrizes de custos foram calculadas por meio da execução do algoritmo de caminho mínimo de Dijkstra (1959), baseado no tempo de deslocamento de um cliente ao outro, esse tempo é calculado pela distância dividida pela velocidade.

Na tabela 3, a coluna *Instância* representa o número da instância de teste, a coluna *Cidade* representa a cidade em que os pontos e as restrições estão distribuídos, a coluna *Pontos* representa a quantidade de pontos pertencentes a instância, a coluna *Restrição* representa a porcentagem de pontos que estão localizados em áreas restritas e

Tabela 3 – Distribuição das Instâncias de Teste

Instância	Cidade	Pontos	Restrição	Janela de Atendimento
1	Fortaleza	50	5%	10%
2	Fortaleza	50	10%	10%
3	Fortaleza	50	15%	10%
4	Fortaleza	100	5%	10%
5	Fortaleza	100	10%	10%
6	Fortaleza	100	15%	10%
7	Fortaleza	150	5%	10%
8	Fortaleza	150	10%	10%
9	Fortaleza	150	15%	10%
10	Recife	50	5%	10%
11	Recife	50	10%	10%
12	Recife	50	15%	10%
13	Recife	100	5%	10%
14	Recife	100	10%	10%
15	Recife	100	15%	10%
16	Recife	150	5%	10%
17	Recife	150	10%	10%
18	Recife	150	15%	10%
19	São Paulo	50	5%	10%
20	São Paulo	50	10%	10%
21	São Paulo	50	15%	10%
22	São Paulo	100	5%	10%
23	São Paulo	100	10%	10%
24	São Paulo	100	15%	10%
25	São Paulo	150	5%	10%
26	São Paulo	150	10%	10%
27	São Paulo	150	15%	10%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

a coluna *Janela de Atendimento* representa a quantidade de pontos que possuem janela de atendimento diferenciadas do centro de distribuição.

As vias com restrições das cidades foram identificadas por meio da portaria AMC Nº 83 DE 29/06/2015 da Autarquia de Trânsito e Cidadania de Fortaleza (AMC) para Fortaleza (AMC, 2017), por meio da Companhia de Trânsito e Transporte Urbano (CTTU, 2017) com o Plano de Trânsito da Prefeitura do Recife (PCR) para Recife e pela Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo (CETSP, 2017) para São Paulo.

As vias de restrições de Fortaleza e Recife foram agrupadas em dois cenários de restrição, um restrito para o veículo Padrão, ou seja, veículos maiores que o VUC e outro sem restrição para o VUC. Em SP, foram definidos três cenários: um sem restrição, um com restrição para o veículo Padrão e outro com restrição para o Padrão e para o VUC. Sendo que, para Fortaleza e Recife as restrições são de período integral e para

São Paulo de 5h às 21h. Vale ressaltar que alguns caminhões de grande porte podem transitar nas vias restritas em horários restritos, contudo devem ter uma atividade específica e uma autorização especial, dependendo da legislação de cada cidade, neste trabalho os caminhões definidos como tipo Padrão não possuem autorização especial.

Os mapas de cada cidade foram alterados com o software QGIS Desktop versão 2.18.3, sendo criado um mapa para cada cenário de restrição de cada cidade, de tal forma que as vias restritas fiquem com custo muito elevado no horário de restrição.

5.2 ALGORITMOS UTILIZADOS

A entrega de pedidos em distribuidoras de grandes centros urbanos, no caso deste trabalho, lida com variáveis do trânsito local. Entre elas, as restrições de circulação que impedem os veículos de circularem em determinadas vias da cidade. Para tratar adequadamente este problema, o agente responsável pela roteirização deve garantir que as rotas dos veículos não trafeguem, mesmo que parcialmente, em áreas restritas. Assim, durante todo o processo de geração das rotas, o agente deve verificar se o veículo pode atender aquele determinado cliente ou se o veículo deve fazer um desvio para atender o cliente sem que entre em uma área restrita. Além disso, o agente deve ficar atento para atender cada clientes em um intervalo de tempo determinado para o cliente, a rota tem que finalizar no depósito antes do fim do expediente e a capacidade dos veículos são diferentes e não podem ser excedidas. Neste trabalho, os algoritmos implementados fazem o papel do agente responsável pela roteirização e são necessários para a execução do método.

A implementação da solução envolve a criação das meta-heurísticas GRASP, VNS e VND, descritas no Capítulo 3, que serão capazes de encontrar soluções mais aproximadas possíveis das soluções ótimas em um tempo de computação menor que métodos exatos. Além disso, para auxiliar as meta-heurísticas implementadas, foram implementadas a heurística construtiva de Clark e Wright e as heurísticas de refinamento 2-opt e 3-opt comentadas nas Seções 3.2.1 e 3.2.2 respectivamente. Para méritos de comparação foram simulados as estratégias utilizadas nas abordagens SDVRP e TDVRP, descritas na seção 2.4 e na seção 2.5 respectivamente. Ambas utilizaram as meta-heurísticas VNS e GRASP. Para diferenciação, a abordagem TDVRP utilizará os VNS0 e GRASP0, enquanto a abordagem SDVRP utilizará VNS1 e GRASP1, conforme a Tabela 4. A diferença dos algoritmos é somente a estratégia utilizada, a TDVRP utiliza dependência de tempo e a SDVRP utiliza roteirização por área.

A função objetivo do GRASP e do VNS são iguais e são calculadas a partir do somatório do tempo de duração de todas as rotas mais um quarto do somatório da quilometragem percorrida por cada veículo. O valor de um quarto da quilometragem foi

Tabela 4 – Diferenciação dos algoritmos por abordagem

Abordagem	VNS	GRASP
TDVRP	VNS0	GRASP0
SDVRP	VNS1	GRASP1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

definido por meio de testes com o VNS. Quando a quilometragem não era considerada ocorria um aumento da distância percorrida para não quebrar a janela de atendimento de um determinado cliente ou esperar muito tempo para poder atendê-lo. Além disso, quando o valor da quilometragem tinha um peso maior algumas janelas de atendimento não eram respeitadas e ocorria um gasto maior de tempo em uma rota. Além disso, a condição de parada do VNS e do GRASP também são iguais que é a quantidade de iterações, na qual o valor é definido como dez.

De forma geral, para a estratégia de dependência de tempo, é verificado se um veículo pode atender uma determinada sequência de clientes, no qual inicia-se no centro de distribuição no início do expediente e termina ao final do expediente também no centro de distribuição. Em cada cliente visitado, é calculado o horário de chegada e partida, também é considerado se o cliente está dentro de uma zona de restrição ou se o caminho até ele passa em vias restritas. Se sim, verifica-se se está dentro do horário de restrição, na hora da chegada ou saída, para o veículo em questão. Se o veículo não é afetado pela restrição, o processo continua com o próximo cliente. Contudo, se o veículo é afetado pela restrição, o cliente é removido da rota, no caso em que ele está dentro da zona de restrição, o veículo contorna a zona de restrição, no caso em que o caminho mais curto passa pela área restrita ou o cliente é atendido em um horário em que a restrição não seja aplicada.

Para a estratégia de clusterização, é feito uma roteirização simples que respeite a janela de atendimento do cliente, pois os clusters são separados por caminhões de acordo com as restrições de determinada região. Logo, é feito uma roteirização por cenário de restrição, de forma que são enviados os clientes restritos junto com veículos permitidos naquela região e, logo a seguir, são enviados os clientes em regiões não restritas com os veículos restantes.

Para a implementação dos algoritmos, foi utilizado o Eclipse JEE Neon 2, um IDE para desenvolvimento Java. Este software é de código aberto e não precisa se obter uma licença para sua utilização. Esta versão é voltada para o desenvolvimento java web, mas possui todas as funcionalidades necessárias para resolução dos modelos que se pretende abordar. Os algoritmos foram implementados na linguagem Java. Essa linguagem de programação foi escolhida devido ao seu paradigma orientado a objetos, sua portabilidade e sua sintaxe similar a C/C++, linguagem utilizadas no meio

acadêmico.

Os experimentos realizados foram executados em um notebook da marca Dell com processador i7 com 2.7GHz, memória RAM de 8 GB, Sistema Operacional Windows 10 e HD de 1 Terabyte. Além disso, cada instância foi executada dez vezes em cada algoritmo.

6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo é realizada uma análise e discussão acerca dos resultados da execução do método em instâncias simuladas. Dentre as diferentes características que poderiam ser avaliadas, optou-se por avaliar quatro, são eles: Distância total percorrida, Tempo total gasto, Quantidade de Rotas geradas e Tempo de execução. A distância total percorrida é o somatório da distância percorrida por cada veículo utilizado, de maneira similar o Tempo Total gasto é o somatório do tempo gasto por cada veículo utilizado. Um dos atributos mais importante é a quantidade de rotas geradas, ou seja, a quantidade de veículos utilizados e por ultimo o tempo de execução de cada instância.

Para experimentação do método proposto, foram realizados testes para avaliar algumas estratégias de roteirização em áreas com restrição. As estratégias escolhidas para experimentação foram a da abordagem TDVRP que utiliza dependência de tempo e a SDVRP que utiliza clusterização.

Para avaliação dos experimentos, foram propostas diferentes instâncias, como pode-se observar na Seção 5.1. Estes observaram a quantidade de clientes a serem atendidos, a quantidade de clientes em áreas restritas e a quantidade de clientes com janela de atendimento. A realização de experimentos em diferentes instâncias permitiu avaliar a eficiência de cada estratégia em outras situações, assim, pode-se verificar quais estratégias são mais interessantes em cada instância.

Em termos de distância total, o GRASP0 foi melhor nas instâncias 1, 2, 6, 7, 9, 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 26. O GRASP1 obteve melhor desempenho nas instâncias 3, 4, 5, 12, 13 e 17. Além disso, o VNS0 obteve melhor resultado somente na instância 10 e o VNS1 obteve melhor desempenho na 8, 11, 14, 15, 16, 25 e 27. Os GRASP0 e o VNS1 obtiveram os melhores desempenho, com diferença menores que 10% em geral, com exceção da instância 11, nas que o VNS1 obteve melhor desempenho. Pode-se visualizar o resultado na Tabela 5. O GRASP0 obteve melhor desempenho na maioria das instâncias de São Paulo e de Fortaleza. Enquanto que o VNS1 obteve melhor desempenho na maioria das instâncias de Recife.

Em relação ao tempo total gasto pelas rotas, o GRASP0 obteve desempenho melhor nas instâncias 6, 7, 9, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 26 e 27. Enquanto que o VNS1 obteve melhor resultado no restante das instâncias. O VNS1 foi em média 12% melhor que o GRASP0 no restante das instâncias. Observa-se que o GRASP1 e VNS0 não obtiveram melhor desempenho em nenhuma instância, no atributo tempo total. Os resultados podem ser observados na Tabela 6. O GRASP0 obteve dominância nas

Tabela 5 – Distância Total (m)

Instância	GRASP0	GRASP1	VNS0	VNS1
1	168.457	176.496	194.540	176.496
2	143.019	169.874	164.845	145.547
3	151.257	134.626	184.067	137.981
4	354.411	342.938	381.518	345.026
5	376.502	358.056	383.182	364.547
6	313.284	319.740	383.075	330.247
7	515.266	556.831	588.956	556.954
8	551.200	560.397	568.978	540.807
9	532.149	579.730	650.839	580.834
10	88.955	101.738	82.128	107.891
11	128.394	114.376	166.490	105.040
12	130.202	100.083	147.778	100.937
13	254.113	228.780	268.134	229.315
14	253.875	237.510	299.521	233.006
15	238.025	221.511	251.311	222.068
16	435.002	430.096	477.395	427.527
17	462.713	424.436	480.882	432.263
18	399.796	416.097	470.275	406.393
19	343.304	430.823	442.840	441.880
20	340.841	449.017	360.384	449.017
21	265.890	340.662	372.566	346.015
22	747.214	952.621	921.488	877.916
23	711.710	739.094	771.214	743.247
24	684.629	777.880	864.172	772.130
25	1,408.962	1,462.523	1,635.166	1,401.775
26	1,290.444	1,350.598	1,525.093	1,350.936
27	1,538.072	1,596.129	1,793.222	1,513.826

Fonte: Elaborado pelo Autor.

instâncias de São Paulo, enquanto que o VNS1 obteve dominância nas instâncias de Recife e Fortaleza. Conclui-se, com isso, que a região e suas restrições tem um impacto relevante na roteirização.

Outro atributo muito importante é a quantidade de veículos utilizados por cada instância. O GRASP0 obteve melhor resultado em todas as instâncias. Porém, o GRASP1 obteve o mesmo resultado que o GRASP0 nas instâncias 3, 4, 12 e 23. O VNS1 obteve o mesmo resultado que o GRASP0 nas instâncias 4, 10, 12, 19, 20 e 23. E, o VNS0 obteve o mesmo resultado nas instâncias 3, 4, 11, 12, 23, 25 e 27. Os resultados podem ser observados na Tabela 7. Além disso, a quantidade de veículos utilizados pode explicar o fato do VNS1 ter obtido bons resultados em distância e tempo total, pois o mesmo utilizou-se de uma quantidade maior de veículos, fazendo rotas curtas, na maioria das instâncias de Fortaleza e Recife. Um outro fator importante que também explica esse

Tabela 6 – Tempo Total (h)

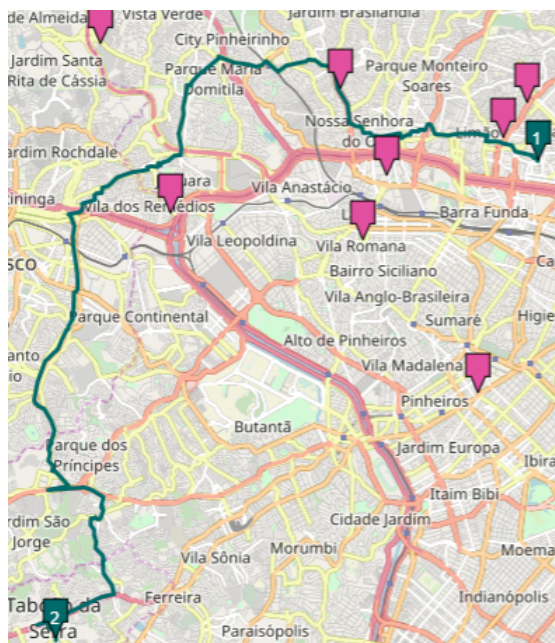
Instância	GRASP0	GRASP1	VNS0	VNS1
1	32,784	46,128	26,933	22,150
2	22,408	22,563	22,791	21,048
3	22,603	27,245	25,202	21,068
4	46,741	65,770	47,812	45,693
5	46,810	65,315	47,096	46,259
6	41,020	65,148	46,857	42,320
7	70,428	75,401	74,995	73,557
8	71,210	97,022	78,422	70,654
9	70,310	72,099	75,496	71,881
10	18,854	37,185	14,129	13,357
11	13,743	17,655	16,849	13,181
12	16,285	34,706	15,994	14,219
13	30,686	42,119	31,549	28,417
14	28,730	60,623	34,065	26,381
15	30,763	45,528	38,887	27,243
16	48,273	102,328	64,092	44,099
17	47,885	60,209	53,253	43,576
18	44,131	75,415	54,362	44,652
19	31,423	36,305	37,868	36,763
20	32,827	37,398	33,583	37,398
21	26,235	32,044	35,383	32,044
22	66,366	75,979	77,341	75,940
23	62,509	65,225	68,081	65,094
24	60,805	66,892	73,545	66,832
25	114,709	139,651	127,563	113,485
26	105,752	129,694	120,241	109,540
27	109,879	116,715	126,053	116,223

Fonte: Elaborado pelo Autor.

resultado é a quebra de restrição, no caso do GRASP0 preocupou-se em contornar as áreas restritas, no VNS1 não. Isso ocasiona um quilometragem maior percorrida e um tempo maior de rota. Além disso, como o GRASP1 e o VNS1 utilizam a roteirização de dois níveis, ocorre de criar uma maior quantidade de rotas e incompletas, ou seja, rotas com sobra de tempo e de capacidade nos veículos. Como exemplo de quebra de restrição, pode-se verificar as Figuras 15 e 16, na qual mostra a execução do GRASP0 e do VNS1 respectivamente.

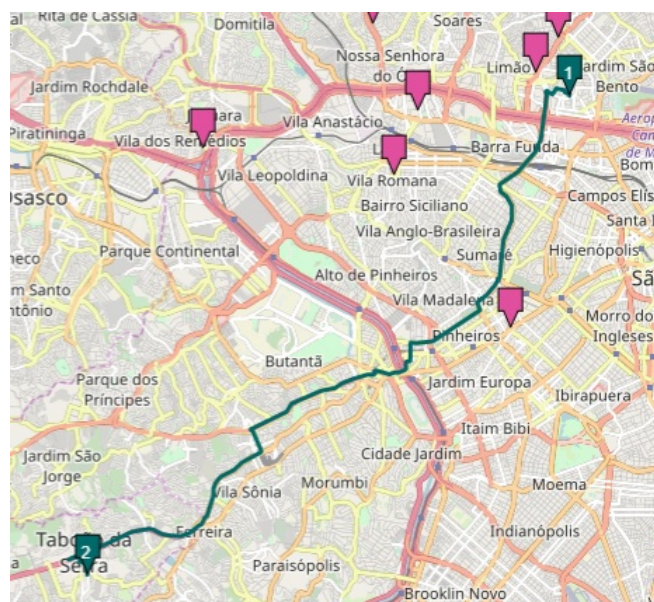
Na Figura 15, os pontos 1 e 2, azuis, estão localizados em São Paulo e foram roteirizados com o algoritmo GRASP0 e um veículo restrito na área de restrição apresentada na Figura 1. De maneira similar, na Figura 16 mostra o resultado da execução do algoritmo VNS1, quebrando a restrição. Os pontos rosas são outros clientes que não foram incluídos na roteirização e a traço azul que liga os pontos 1 e 2

Figura 15 – Execução do algoritmo GRASP0 para dois clientes que simulam os pontos 2 e 3 da Figura 4



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Figura 16 – Execução do algoritmo VNS1 para dois clientes que simulam os pontos 2 e 3 da Figura 4



Fonte: Elaborado pelo Autor.

é o caminho mínimo entre os dois pontos.

Em relação ao tempo de execução o GRASP1 e o VNS1 obtiveram melhor resultado. O GRASP1 obteve melhor desempenho nas instâncias 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Enquanto que o VNS1 obteve o melhor resultado no restante das instâncias (7, 8, 9, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26 e 25). Além disso, como a

Tabela 7 – Quantidade de Rotas

Instância	GRASP0	GRASP1	VNS0	VNS1
1	5	6	6	6
2	3	5	4	4
3	3	3	4	3
4	8	8	8	8
5	7	8	8	8
6	6	7	8	7
7	8	10	10	9
8	9	11	11	10
9	9	11	11	11
10	3	4	3	4
11	5	6	6	5
12	4	4	4	4
13	6	7	7	7
14	7	9	10	8
15	6	7	8	7
16	10	13	14	12
17	10	12	12	12
18	7	9	9	9
19	4	5	4	5
20	4	5	4	5
21	3	4	5	4
22	8	10	10	9
23	7	7	7	7
24	7	8	9	8
25	12	13	14	12
26	11	12	13	12
27	12	13	14	12

Fonte: Elaborado pelo Autor.

roteirização de clusterização é feita de maneira mais simples, o GRASP1 e o VNS1 obtiveram um menor tempo de execução, conforme pode-se visualizar na Tabela 8. O VNS de forma geral, tem etapas mais simples que o GRASP, mas depende de como é criado a solução inicial e da quantidade de interações.

Uma comparação geral entre o resultado obtido nas diferentes instâncias já evidencia uma predominância do GRASP0 e GRASP1. Observando, por exemplo, a dominância do VNS1 em tempo total, conforme a Tabela 6 e do GRASP0 na quantidade de veículos utilizados, conforme a Tabela 7. Em termos de distância total e tempo total ocorreu um maior equilíbrio entre os algoritmos, ou seja, não ocorreu um grande desvio.

De forma geral, a implementação do método mostrou-se eficaz de tal forma que não foi constatada quebra de restrição nos algoritmos GRASP0 e VNS0. Contudo,

Tabela 8 – Tempo de execução (s)

Instância	GRASP0	GRASP1	VNS0	VNS1
1	20,465	1,969	2,079	3,224
2	15,831	800	6,974	1,167
3	11,952	3,321	5,692	3,601
4	106,016	2,489	61,285	2,906
5	71,955	1,591	34,547	2,065
6	168,280	4,178	71,780	4,857
7	380,495	6,126	148,037	5,368
8	345,391	5,415	239,874	4,148
9	336,009	5,841	160,371	4,654
10	8,652	1,866	11,657	3,296
11	69,524	678	3,727	846
12	31,432	997	7,151	1,688
13	127,278	1,903	45,589	2,861
14	129,545	1,297	17,848	1,830
15	197,494	3,414	32,726	5,466
16	393,229	4,700	137,825	5,650
17	424,378	2,204	121,078	2,964
18	524,611	8,198	269,163	8,007
19	11,730	1,002	7,438	753
20	10,486	871	5,001	628
21	14,533	792	2,840	763
22	67,766	2,115	29,042	1,594
23	90,551	2,707	50,475	2,083
24	87,547	2,837	34,568	1,885
25	244,206	3,827	124,655	1,779
26	292,847	3,456	85,512	2,042
27	212,017	3,719	124,309	2,131

Fonte: Elaborado pelo Autor.

necessita-se de um tempo maior de execução que a abordagem SDVRP implementadas nos algoritmos GRASP1 e VNS1.

O GRASP0 obteve um melhor resultado que o VNS0, pelo fato de que a solução inicial do VNS0, algoritmo das economias, precisou de adaptações para dar uma solução viável de entrada. Além disso, o número de interações utilizadas no VNS0 foi um valor baixo, o que dificulta a melhoria da solução inicial.

Em relação aos algoritmos GRASP1 e VNS1, a abordagem PRVRA só não quebrou restrição na cidade de Recife. Observou-se que as áreas restritas de Recife estão geograficamente isoladas, por este fato essa abordagem se tornou viável. Logo, os algoritmos propostos GRASP0 e VNS0 são mais eficazes que o da abordagem comparativa GRASP1 e VNS1. Assim, o método proposto e testado em um ambiente próximo do real, pode ser executado para a roteirização em ambientes reais.

Para a proposição do método de roteirização de veículos em cidades com restrições de circulação, foi necessário adotar a abordagem do TDVRP. Esse modelo, baseado nesta abordagem, permite que os veículos contornem as áreas de restrição, o que não ocorre nos demais modelos. Isso é fundamental para a otimização do processo de roteirização e para evitar possíveis custos adicionais com a quebra das restrições. Além disso, isso é a principal vantagem de utilizar a abordagem TDVRP.

Com relação aos métodos heurísticos utilizados, apresentados no Capítulo 3, estes viabilizaram que medidas de ajuste das rotas pudessem ser realizadas, permitindo assim que os veículos não entrassem em áreas restritas.

Como a aplicação realizada dá-se em uma região com legislação real, concebida por meio de estudos da legislação de cada cidade, a pessoa responsável pela modelagem necessita entender a legislação da nova região, informando as novas características de restrição da região para os veículos disponíveis. Além disto, novas aplicações devem implicar em ajustes no modelo, levando em consideração novos problemas, requisitos mais específicos da região e da distribuidora, jornada de trabalho esperada, tempos de atendimento esperado, dentre outros parâmetros necessários para roteirização.

Por fim, esta análise exprime diferentes características dos experimentos feitos. Além disso, nota-se que a utilização da roteirização de clusterização pode ser vantajoso quando existir alterações manuais pós roteirização, evitando a quebra de restrição.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

Esta dissertação propõe um método para roteirização de veículos em regiões com restrição de circulação. A estratégia de roteirização com dependência de tempo sugerida serviu para avaliar o método em grandes centros urbanos. Os atributos levados em conta na roteirização permitiram comparar as abordagens TDVRP e SDVRP em diferentes instâncias. Assim, foi possível observar os custos associados às abordagens e as melhorias alcançadas por estas. Além disso, foram criadas 27 instâncias e o as etapas de como produzi-las para futuras pesquisas e comparações de trabalhos relacionados foram detalhadas.

A fase inicial do método, que identifica as vias restritas da região em que ocorrerá a roteirização é necessária para mapear e modelar os cenários de restrição para cada veículo. Para isso, é necessário identificar os órgãos de fiscalização da região e buscar a legislação vigente sobre as restrições.

Durante a análise de resultados da simulação, pode-se verificar qual abordagem é a mais relevante para a aplicação proposta, destacando vantagens e desvantagens através dos atributos mensurados. Na qual, a abordagem TDVRP consegue obter melhores resultados sem quebrar as restrições. Os algoritmos propostos nesse trabalho mostraram-se eficazes como estratégias de roteirização. As adaptações no construtor inicial do GRASP, utilização de uma heurística de refinamento para decidir em qual posição o elemento vai ser inserido, permitiram uma melhoria do resultado da roteirização. Além disso, como o GRASP tem um processo iterativo, o controle das quebras das restrições e da seleção dos veículos foram facilitados na hora da implementação.

Por meio desse método, empresas podem reduzir o processo de planejamento das suas entregas, fazendo uma roteirização rápida e efetiva. Contudo, o trabalho de modelagem das restrições e mapas é demorado e necessita de pesquisa e uso de ferramentas adicionais, mas é preciso fazê-lo somente uma vez por região. Após isso, deve-se atualizar os clientes com suas informações de demanda, localização, janela de tempo e zona de restrição.

Uma outra linha de pesquisa poderia avaliar o impacto das restrições no meio ambiente e no custo da roteirização. Nestas linhas, é levado em conta a emissão de dióxido de carbono e o custo adicional do combustível respectivamente, devido o contorno das áreas restritas e o uso de uma quantidade maior de veículos.

Por fim, sugere-se como trabalho futuro a adaptação das abordagens para atender múltiplas janelas de restrição e múltiplas janelas de atendimentos nos clientes. Neste caso, a complexidade do problema seria elevada, mas atenderia a todos os cenários reais. Estas janelas de restrição diferenciada podem conferir aos cenários de restrição com dois ou mais intervalos em que os veículos não podem entrar em área restritas. Como por exemplo na cidade de Fortaleza para distribuidoras de gás de cozinha, na qual os horários restritos são no intervalo de 0h às 10h da manhã e de 16h às 24h da noite, na legislação vigente. Além disso, ainda como trabalhos futuros, sugere-se a implementação do GRASP Reativo e do GRASP-Learning, para buscar melhores resultados.

REFERÊNCIAS

- AFSHAR-NADJAFI, B.; AFSHAR-NADJAFI, A. Multi-depot time dependent vehicle routing problem with heterogeneous fleet and time windows. *International Journal of Operational Research*, Inderscience Publishers (IEL), v. 26, n. 1, p. 88–103, 2016.
- AFSHAR-NADJAFI, B.; AFSHAR-NADJAFI, A. A constructive heuristic for time-dependent multi-depot vehicle routing problem with time-windows and heterogeneous fleet. *Journal of king saud university-Engineering sciences*, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 29–34, 2017.
- AMARAL, R. R.; AGHEZZAF, E.-H. City logistics and traffic management: Modelling the inner and outer urban transport flows in a two-tiered system. *Transportation Research Procedia*, Elsevier, v. 6, p. 297–312, 2015.
- AMC. PORTARIA DA AMC Nº 83/2015. 2017. <http://geofi.fortaleza.ce.gov.br/aet/PORTARIA_AMC_N_83_2015.pdf>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- ARAGÃO JUNIOR, D. P. *Colaboração em sistemas multiagentes na roteirização dinâmica de veículos: Um método para avaliação de estratégias em empresas OEM*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC - Brasil, 4 2014.
- BALSEIRO, S.; LOISEAU, I.; RAMONET, J. An ant colony algorithm hybridized with insertion heuristics for the time dependent vehicle routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 38, n. 6, p. 954–966, 2011.
- BELENGUER, J. M. et al. A branch-and-cut algorithm for the single truck and trailer routing problem with satellite depots. *Transportation Science*, INFORMS, v. 50, n. 2, p. 735–749, 2015.
- CATTARUZZA, D. et al. A memetic algorithm for the multi trip vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 236, n. 3, p. 833–848, 2014.
- CETSP. *Locais com restrição ao caminho*. 2017. <<http://www.cetsp.com.br/consultas/caminhoes/loais-com-restricao-ao-caminhao.aspx>>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- CHAO, I.-M.; GOLDEN, B.; WASIL, E. A computational study of a new heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. *INFOR: Information Systems and Operational Research*, Taylor & Francis, v. 37, n. 3, p. 319–336, 1999.
- CHAO, I.-M.; LIOU, T.-S. A new tabu search heuristic for the site-dependent vehicle routing problem. *The next wave in computing, optimization, and decision technologies*, Springer, p. 107–119, 2005.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, Inform, v. 12, n. 4, p. 568–581, 1964.
- CRAINIC, T. G. et al. Impact of generalized travel costs on satellite location in the two-echelon vehicle routing problem. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, v. 39, p. 195–204, 2012.

- CRAINIC, T. G.; RICCIARDI, N.; STORCHI, G. Models for evaluating and planning city logistics systems. *Transportation science*, INFORMS, v. 43, n. 4, p. 432–454, 2009.
- CROES, G. A. A method for solving traveling-salesman problems. *Operations research*, INFORMS, v. 6, n. 6, p. 791–812, 1958.
- CTTU. *Companhia de Trânsito e Transporte Urbano*. 2017. <<http://www2.recife.pe.gov.br/secretariaorgao/cttu>>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- DABLANC, L. Goods transport in large european cities: Difficult to organize, difficult to modernize. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Elsevier, v. 41, n. 3, p. 280–285, 2007.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management science*, Inform, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- DONATI, A. V. et al. Time dependent vehicle routing problem with a multi ant colony system. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 185, n. 3, p. 1174–1191, 2008.
- FEO, T. A.; RESENDE, M. G. Greedy randomized adaptive search procedures. *Journal of global optimization*, Springer, v. 6, n. 2, p. 109–133, 1995.
- FIGLIOZZI, M. A. The time dependent vehicle routing problem with time windows: Benchmark problems, an efficient solution algorithm, and solution characteristics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 48, n. 3, p. 616–636, 2012.
- FIRJAN. *Os custos da (i)mobilidade nas regiões metropolitanas do Rio de Janeiro e São Paulo*. 2014. <<http://www.firjan.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=2C908A8F4EBC426A014EC051E736421F&inline=1>>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- FISHER, M. L. Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees. *Operations research*, INFORMS, v. 42, n. 4, p. 626–642, 1994.
- FISHER, M. L.; JAIKUMAR, R. A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, Wiley Online Library, v. 11, n. 2, p. 109–124, 1981.
- FRANCESCHETTI, A. et al. Strategic fleet planning for city logistics. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 95, p. 19–40, 2017.
- GERDESSEN, J. C. Vehicle routing problem with trailers. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 93, n. 1, p. 135–147, 1996.
- GIANESSI, P. et al. A column generation based heuristic for the multicommodity-ring vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia*, Elsevier, v. 12, p. 227–238, 2016.
- KIM, G. et al. City vehicle routing problem (city vrp): A review. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 16, n. 4, p. 1654–1666, 2015.

- KINDERVATER, G. A.; SAVELSBERGH, M. W. Vehicle routing: handling edge exchanges. *Local search in combinatorial optimization*, Wiley Chichester, UK, p. 337–360, 1997.
- KNEIB, E. C. Mobilidade urbana e qualidade de vida: do panorama geral ao caso de goiânia. *Revista UFG*, v. 14, n. 12, 2012.
- KRITZINGER, S. et al. Using traffic information for time-dependent vehicle routing. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, Elsevier, v. 39, p. 217–229, 2012.
- LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, JSTOR, p. 497–520, 1960.
- LENSTRA, J. K.; KAN, A. Complexity of vehicle routing and scheduling problems. *Networks*, Wiley Online Library, v. 11, n. 2, p. 221–227, 1981.
- LIMA JÚNIOR, F. C. *Algoritmo Q-Learning como Estratégia de Exploração e/ou Exploração para as Metaheurísticas GRASP e Algoritmo Genético*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN - Brasil, 5 2009.
- Lima Júnior, F. C.; MELO, J. D. de; Doria Neto, A. D. Using the q-learning algorithm in the constructive phase of the grasp and reactive grasp metaheuristics. In: IEEE. *Neural Networks, 2008. IJCNN 2008. (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*. IEEE International Joint Conference on. [S.l.], 2008. p. 4169–4176.
- LIN, S. Computer solutions of the traveling salesman problem. *The Bell system technical journal*, Nokia Bell Labs, v. 44, n. 10, p. 2245–2269, 1965.
- LIN, S.; KERNIGHAN, B. W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem. *Operations research*, INFORMS, v. 21, n. 2, p. 498–516, 1973.
- LIN, S.-W.; VINCENT, F. Y.; CHOU, S.-Y. Solving the truck and trailer routing problem based on a simulated annealing heuristic. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 1683–1692, 2009.
- LIN, S.-W.; VINCENT, F. Y.; CHOU, S.-Y. A note on the truck and trailer routing problem. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 899–903, 2010.
- LIN, S.-W.; VINCENT, F. Y.; LU, C.-C. A simulated annealing heuristic for the truck and trailer routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, v. 38, n. 12, p. 15244–15252, 2011.
- LONG, J.; SZETO, W. Y.; HUANG, H.-J. A bi-objective turning restriction design problem in urban road networks. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 237, n. 2, p. 426–439, 2014.
- MALANDRAKI, C.; DASKIN, M. S. Time dependent vehicle routing problems: Formulations, properties and heuristic algorithms. *Transportation science*, INFORMS, v. 26, n. 3, p. 185–200, 1992.
- MLADENOVIC, N.; HANSEN, P. Variable neighborhood search. *Computers & operations research*, Elsevier, v. 24, n. 11, p. 1097–1100, 1997.

- MUÑOZURI, J. et al. City logistics in Spain: Why it might never work. *Cities*, Elsevier, v. 29, n. 2, p. 133–141, 2012.
- MUÑOZURI, J. et al. Estimating the extra costs imposed on delivery vehicles using access time windows in a city. *Computers, Environment and Urban Systems*, Elsevier, v. 41, p. 262–275, 2013.
- NEO. *Vehicle Routing Problem*. 2013. <<http://neo.lcc.uma.es/vrp/>>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- NOVAES, A. *Logística e gerenciamento da cadeia de distribuição*. [S.l.]: Elsevier Brasil, 2016.
- OPENSTREETMAP. *OpenStreetMap*. 2004. <<https://www.openstreetmap.org/>>. [Acessado em 20 de Agosto de 2017].
- PARRAGH, S. N.; CORDEAU, J.-F. Branch-and-price and adaptive large neighborhood search for the truck and trailer routing problem with time windows. *Computers & Operations Research*, Elsevier, v. 83, p. 28–44, 2017.
- PILLAC, V. *Computational Aspects Of Vehicle Routing*. 2013. <<https://victorpillac.com/about/academic/vrp2013/>>. [Acessado em 15 de Fevereiro de 2017].
- PRAIS, M.; RIBEIRO, C. C. Reactive grasp: An application to a matrix decomposition problem in tdma traffic assignment. *INFORMS Journal on Computing*, INFORMS, v. 12, n. 3, p. 164–176, 2000.
- SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. *Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação*. 3. ed. rev. atual, 2001.
- SOLER, D.; ALBIACH, J.; MARTÍNEZ, E. A way to optimally solve a time-dependent vehicle routing problem with time windows. *Operations Research Letters*, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 37–42, 2009.
- SOYSAL, M.; BLOEMHOF-RUWAARD, J. M.; BEKTAŞ, T. The time-dependent two-echelon capacitated vehicle routing problem with environmental considerations. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 164, p. 366–378, 2015.
- STEPHENS, R. *Four Heuristic Solutions to the Traveling Salesperson Problem*. 2007. <<http://www.devx.com/dotnet/Article/33574>>. [Acessado em 30 de Abril de 2017].
- STRUWIG, C. B.; RUTHVEN, G. A.; LEIPZIG, K. V. The application of design criteria for locating a hub configured supply chain for a restaurant cluster in the Stellenbosch area. *Journal of Transport and Supply Chain Management*, AOSIS, v. 7, n. 1, p. 1–7, 2013.
- ZARE-REISABADI, E.; MIRMOHAMMADI, S. H. Site dependent vehicle routing problem with soft time window: Modeling and solution approach. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier, v. 90, p. 177–185, 2015.