

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES E LOGÍSTICA

FLÁVIA HAWEROTH

**APLICAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS NO
TRANSPORTE PÚBLICO DE PESSOAS COM DEFICIÊNCIA NO MUNICÍPIO DE
JOINVILLE - SC**

Joinville

2017

FLÁVIA HAWEROTH

**APLICAÇÃO DE ROTEIRIZAÇÃO E PROGRAMAÇÃO DE VEÍCULOS NO
TRANSPORTE PÚBLICO DE PESSOAS COM DEFICIÊNCIA NO MUNICÍPIO DE
JOINVILLE - SC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Transportes e Logística, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientadora: Prof.^a Vanina Macowski Durski Silva, Dr.^a Eng.

Joinville

2017

AGRADECIMENTOS

A meus familiares, em especial a meus pais, pelo apoio incondicional que me deram durante o curso.

Agradeço também à minha segunda família, formada pelos meus amigos, tanto os que a universidade me trouxe quanto aqueles que já estão na minha vida há mais tempo. Um agradecimento especial à Arethusa e à Evellyn pelo companheirismo até os últimos momentos.

A minha orientadora Vanina Macowski Durski Silva pelo apoio e pela orientação, não apenas nesse trabalho de conclusão de curso, mas em todos os projetos em que trabalhamos juntas.

Aos demais professores do curso de Engenharia de Transportes e Logística e outros que passaram pela minha formação. Tenho a certeza de que deixo essa graduação levando algo que aprendi com cada um, não apenas para o exercício da profissão, mas para a vida profissional e pessoal.

E por último, a todos que contribuíram para a realização desse trabalho, especialmente aos funcionários da Passebus, Transtusa e Gidion, e aos colegas de estágio que também contribuíram para a coleta de dados e sugestões.

*“Se soubéssemos o que era que estávamos
fazendo, não seria chamada de pesquisa, seria?”*

Albert Einstein

*“[...] tratar igualmente os iguais e desigualmente
os desiguais, na medida em que eles se
desigualam”*

Aristóteles

RESUMO

O número de pessoas com deficiência aumentou em todo o mundo no último século, levando à um processo de mudança da visão legal dessas pessoas perante a sociedade e impulsionando as discussões em torno da acessibilidade e inclusão social. O transporte público, como meio de acesso a outros serviços, é essencial para essa inclusão e, por isso, alguns serviços especiais de transporte porta-a-porta surgiram para atender pessoas com deficiência ou restrição de mobilidade. Em Joinville-SC, esse serviço se chama Transporte Eficiente e realiza uma média de 350 atendimentos por dia, levando os usuários até postos de trabalho, escolas, consultas médicas ou outra atividade. O Transporte Eficiente, por ser um transporte de pessoas, precisa equilibrar o custo operacional e o nível de conforto oferecido aos passageiros. Nesse contexto, contribuições de engenharia, como métodos da área de Pesquisa Operacional (PO), podem ser utilizadas para contribuir na busca desse equilíbrio. Esse tipo de transporte público para pessoas com deficiência pode ser modelado como um problema de roteirização e de veículos denominado *Dial-a-Ride Problem* (DARP). É neste cenário que este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo realizar um estudo de roteirização, no intuito de possibilitar o aumento da qualidade do serviço, bem como a redução dos custos. Para isso, foi usada a meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS) na otimização de uma função multiobjetivo que considera, além do custo operacional, a inconveniência da rota para os usuários. Foi possível, na análise dos resultados, tirar conclusões sobre o uso da função multiobjetivo em uma aplicação real.

Palavras-chave: Problema *dial-a-ride*. Transporte público. Roteirização. *Iterated Local Search*.

ABSTRACT

The number of people with disabilities has increased throughout the world in the last century, leading to a process of changing the legal vision of them, pushing society discussions around accessibility and social inclusion. Public transport, as a mean of accessing other services, is essential for this inclusion, therefore, some special door-to-door transport services arose to assist people with disabilities or mobility restrictions. In Joinville-SC, this service is called *Transporte Eficiente* and carries out an average of 350 calls per day, taking users to jobs, schools, medical consultations or other activity. The *Transporte Eficiente*, as a transport of people, needs balance between operational costs and comfort offered to the passengers. In this context, engineering contributions such as methods of the Operational Research (OR) area can be used in search of this equilibrium. This kind of public transportation of people with disabilities can be modeled as a routing problem called Dial-a-Ride Problem (DARP). It is in this scenario that this work aims to conduct a study of routing in order to enable the quality increase of service as well as cost reduction. Therefore, an Iterated Local Search (ILS) was used in the optimization of a multiobjective function that considers, in addition to operational cost, an inconvenience measure of the route to users. It was possible, in the analysis of the results, to draw conclusions about the use of the multiobjective function in a real application.

Keywords: Dial-a-ride problem. Public transport. Routing. Iterated Local Search.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas de pesquisa.....	15
Figura 2 – Viagens (em bilhões) realizadas em 2014, por modo principal	19
Figura 3 – Ilustração do Problema de Roteirização de Veículos Capacitados	26
Figura 4 – Exemplo de roteiro e programação de coleta e entrega	30
Figura 5 - Classificação do DARP em relação aos Problemas de Roteirização de Veículos...	31
Figura 6 – Fluxograma de recebimento das solicitações do Transporte Eficiente	42
Figura 7 – Veículo do Transporte Eficiente	43
Figura 8 – Esquema da divisão da rota diárias de cada veículo	45
Figura 9 – Heurística de programação.....	47
Figura 10 – Movimento reordenar rota.....	48
Figura 11 – Movimento realocar	49
Figura 12 – Movimento troca	49
Figura 13 – Funcionamento da ILS	50
Figura 14 – Algoritmo ILS	51
Figura 15 – Relação entre o número de requisições e o tempo de execução do método	53
Quadro 1 – Características dos PRVs e suas variações	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Indicadores do sistema de transporte público de Joinville	20
Tabela 2 – Capacidades dos veículos do Transporte Eficiente	43
Tabela 3 – Faixas de velocidades adotadas conforme distância.....	46
Tabela 4 – Resultados da função objetivo	53
Tabela 5 – Distância total percorrida e duração da rota na operação individual.....	54
Tabela 6 – Comparação entre as distâncias reais e as propostas pelo método	55
Tabela 7 – Tempo de espera e tempo de viagem na operação individual	56
Tabela 8 – Análise das violações das janelas de tempo e da capacidade do veículo	56
Tabela 9 – Resultados da função objetivo com a operação integrada das empresas.....	58
Tabela 10 – Distância total percorrida e duração das rotas na operação combinada	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ADA – *American with Disabilities Act*

ANTP – Agência Nacional de Transportes Públicos

CETURB/GV – Companhia e Transportes Urbanos da Grande Vitória

DARP – *Dial-a-ride Problem*

EMDEC – Empresa Municipal de Desenvolvimento de Campinas

GVBUS – Sindicato das Empresas de Transporte Metropolitano da Grande Vitória

ILS – *Iterated Local Search*

IPPUJ – Fundação Instituto de Pesquisa e Planejamento para o Desenvolvimento Sustentável de Joinville

MTC – *Montreal Transit Commission*

NTU – Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos

OMS – Organização Mundial da Saúde

ONU – Organização das Nações Unidas

PAI – Programa de Acessibilidade Inclusiva

PCV – Problema do Caixeiro Viajante

PEC – Proposta de Emenda à Constituição

PO – Pesquisa Operacional

PRV – Problema de Roteirização de Veículos

PRPV – Problema de Roteirização e Programação de Veículos

SA – *Simulated Annealing*

SPTRANS – São Paulo Transporte S.A

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO.....	11
1.2 OBJETIVOS	13
1.2.1 Objetivo geral	13
1.2.2 Objetivos específicos	14
1.3 MÉTODO DE PESQUISA	14
1.4 JUSTIFICATIVAS	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2. TRANSPORTE PÚBLICO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA.....	18
2.1 TRANSPORTE PÚBLICO URBANO	18
2.2 TRANSPORTE PÚBLICO ESPECIAL PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA	21
2.2.1 Conceitos e legislação específica	21
2.2.2 Exemplos no Brasil de transporte público especial para pessoas com deficiência..	23
3. ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS - O PROBLEMA <i>DIAL-A-RIDE</i>	25
3.1 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS.....	25
3.1.1 Definição	25
3.1.2 Classificação	27
3.2 PROBLEMA <i>DIAL-A-RIDE</i>	29
3.2.1 Definição	29
3.2.2 Formulação matemática	32
3.2.3 Métodos de resolução exatos e heurísticos	36
4. ESTUDO DE CASO.....	41
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	41
4.1.1 Histórico e funcionamento do serviço	41
4.1.2 Construção das variáveis do modelo	44
4.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE SOLUÇÃO	47
4.2.1 Solução inicial	47
4.2.2 Programação	47
4.2.3 Busca local e a meta-heurística ILS	48
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	52
5.1 ANÁLISE DA OPERAÇÃO INDIVIDUAL DAS EMPRESAS	52

5.1.1	Função objetivo	52
5.1.2	Custo operacional e conforto do usuário	54
5.2	ANÁLISE PARA A INTEGRAÇÃO DAS EMPRESAS	57
5.2.1	Função objetivo	57
5.2.2	Custo operacional e conforto do usuário	58
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
6.1	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	60
6.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	61
	REFERÊNCIAS	62

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados o tema em estudo e o problema proposto para este trabalho de conclusão de curso, bem como os objetivos a serem alcançados e o método de pesquisa adotado. Por fim, apresentam-se as justificativas e relevância acadêmica sobre o estudo do problema de transporte público de pessoas com deficiência sob a ótica de roteirização, seguidos da apresentação da estrutura do trabalho.

1.1 TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO

Na Europa e nos Estados Unidos, um aumento do número de pessoas com deficiência foi registrado devido à Primeira e Segunda Guerra Mundial, já no Brasil o mesmo fenômeno se deu devido ao crescimento da violência urbana, acidentes de trânsito, atendimento de saúde precário, entre outros (SILVEIRA, 2012). Esses fatos iniciaram grandes discussões e mudanças ao redor do mundo sobre a inclusão social das pessoas com deficiência, envolvendo diretamente as condições de acessibilidade das cidades e dos serviços essenciais.

Segundo Souza e Marques (2016), a inclusão social deve ser entendida como o “[...] processo pelo qual a sociedade se adapta de forma a poder incluir, em todos os seus sistemas, pessoas com necessidades especiais e, em simultâneo, estas se preparam para assumir o seu papel na sociedade” (p. 8).

No Brasil, a Constituição de 1988 iniciou o processo de mudança legislativa com a alteração da visão legal das pessoas com deficiência perante a sociedade, substituindo uma visão paternalista e assistencialista pela equiparação de oportunidades e garantindo o exercício pleno da cidadania (BARONI; RESENDE, 2006). Essa mudança foi o início para muitas outras que permitiram que estas pessoas se desenvolvessem como indivíduos e passassem a participar ativamente da sociedade.

Mundialmente, a Organização das Nações Unidas (ONU) publicou a Convenção sobre os Direitos das Pessoas com Deficiência, um tratado elaborado em conjunto pelas nações como uma forma de coordenar os esforços a nível mundial. Este documento foi incorporado à legislação brasileira em 2008 com equivalência de emenda constitucional, tornando-se um

instrumento de respeito aos Direitos Humanos (BRASIL, 2011).

Tornar uma cidade acessível é garantir que todos que vivem nela tenham acesso aos serviços essenciais e garantidos constitucionalmente, dependendo assim, diretamente do acesso ao transporte público. Para isso, Baroni e Resende (2006) afirmam que é necessário respeitar as limitações de cada um e utilizar a tecnologia para o alcance da igualdade, permitindo assim, que todos possam utilizar os sistemas disponíveis com autonomia e segurança.

Percebe-se, portanto, a necessidade de adequações das atividades, operações e mecanismos de um município às necessidades da população, incluindo o serviço de transporte público urbano. Neste contexto, um trabalho que atentou para esta problemática foi realizado por Silveira (2012) e focou na análise da acessibilidade espacial no transporte público urbano de Joinville, no estado de Santa Catarina, e os principais problemas encontrados foram a escassez de informações acessíveis aos usuários, as condições das calçadas (desníveis, revestimento trepidante e ausência de rampas) e a altura de embarque e desembarque dos ônibus. Isso mostra que, apesar do avanço nas legislações e normas, existe ainda necessidade de esforço financeiro e político para que as cidades brasileiras possam se tornar verdadeiramente acessíveis.

A fim de garantir a acessibilidade das pessoas com deficiência, algumas cidades brasileiras possuem um sistema porta-a-porta que funciona à parte do convencional para esse público. Em Joinville, esse serviço leva o nome de Transporte Eficiente e foi criado no ano 2000 pelo Decreto Municipal nº 9.561. O sistema é parte integrante do serviço regular de transporte coletivo urbano, operado por duas empresas concessionárias. Em média, são realizados 350 atendimentos por dia para transportar pessoas com mobilidade reduzida até atendimentos médicos, escolas, faculdades, associações e empresas. O serviço opera com 12 veículos do tipo micro-ônibus e, juntos, eles percorrem em média 2.040 km todos os dias (GIDION, 2016; PASSEBUS, 2017).

A maior parte dos usuários possui necessidades de transporte diárias ou periódicas para ir ao trabalho, escola, universidade ou tratamentos médicos. Esses usuários fazem parte de um cronograma fixo das empresas e somam mais de 70% do total das requisições (PASSEBUS, 2017). As demais requisições são eventuais e devem ser feitas com até um dia de antecedência, mas nem sempre podem ser atendidas e acabam em uma lista de espera para eventuais encaixes. Sendo assim, é de interesse das empresas operadoras encontrar meios de proporcionar uma oferta maior do serviço, através de um melhor planejamento das rotas de atendimento sem investimento em veículos adicionais. Problemas com estas características podem ser estudados pelo ramo da Pesquisa Operacional (PO) chamado Roteirização de Veículos.

Entre os Problemas de Roteirização de Veículos (PRVs), o Problema *Dial-a-Ride* (DARP, do inglês *Dial-a-Ride Problem*) é usado para representar dentro da PO o transporte sob demanda de passageiros. Conforme explicado por Znamenski e Cunha (1999), o nome decorre da possibilidade de solicitar o serviço por telefone, mas ao contrário de um serviço de táxi (que também é solicitado pelo telefone) vários passageiros podem compartilhar o veículo durante trechos da viagem. Ao fazer a solicitação, o usuário deve informar um ponto de embarque, um ponto de desembarque e uma necessidade de horário que juntos formam uma requisição de transporte do DARP (MAURI; LORENA, 2009). As requisições podem ser conhecidas antes do início da rota ou depois. No primeiro caso o DARP é do tipo estático e no segundo caso é dinâmico (CORDEAU, 2006). Nesse trabalho será tratado o caso estático que consiste apenas nas requisições que fazem parte do cronograma fixo do Transporte Eficiente, sem se preocupar com as requisições que chegam durante o dia ou cancelamentos.

Segundo Fraga Neto (2015) “os problemas de roteirização [...] e programação de veículos são extensamente abordados na literatura de transportes, justificados pelas possibilidades de redução de custos às organizações ou aumento da conveniência aos usuários”. Assim, é neste contexto que este trabalho de conclusão de curso pretende atuar, ao utilizar métodos da PO no processo de roteirização do Transporte Eficiente, para que esse possa oferecer mobilidade e acessibilidade a cada vez mais pessoas com deficiência do município de Joinville sem gerar aumento dos custos operacionais.

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico apresentam-se os objetivos geral e específicos que este trabalho pretende alcançar.

1.2.1 Objetivo geral

Realizar um estudo de roteirização no serviço Transporte Eficiente, em Joinville, propondo uma nova configuração das rotas de atendimento no intuito de aumentar a qualidade do serviço e reduzir o custo pela distância total percorrida.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar o sistema de transporte público urbano para pessoas com deficiência de Joinville (Transporte Eficiente) relacionando-o com o Problema *Dial-a-Ride*;
- Mapear os principais modelos e métodos de solução do DARP;
- Selecionar entre os modelos e métodos de solução pesquisados um que se adeque ao caso do Transporte Eficiente;
- Implementar o método escolhido levando em consideração as adequações necessárias na representação do Transporte Eficiente como um DARP;
- Realizar os testes para uma semana de serviço do Transporte Eficiente e avaliar os resultados.

1.3 MÉTODO DE PESQUISA

O presente trabalho partiu da escolha do tema de estudo e então iniciou-se o referencial teórico e uma coleta preliminar de dados junto às empresas operadoras do Transporte Eficiente. Para o referencial teórico foram realizadas buscas no Portal de Periódicos e no Banco de Teses e Dissertações da Capes. As buscas foram feitas usando o termo “*dial-a-ride*” e no portal de periódicos considerou-se apenas resultados do tipo artigo. Na busca sem especificação de período foram encontrados 159 artigos, sendo o mais antigo datado em 1975. Com o intuito de reduzir o número de resultados, concentrou-se no espaço de busca dos últimos 5 anos e foram, então, encontrados 65 artigos. No banco de teses, a busca levou a um resultado de 11 teses e dissertações.

Entre os artigos encontrados, foram mantidos em análise aqueles que abordavam estudos com configuração similar ao desse trabalho ou que forneciam uma boa base teórica. A partir deles, foram identificados os trabalhos mais antigos de destaque na área de estudo do DARP e estes foram adicionados gradativamente à base de pesquisa.

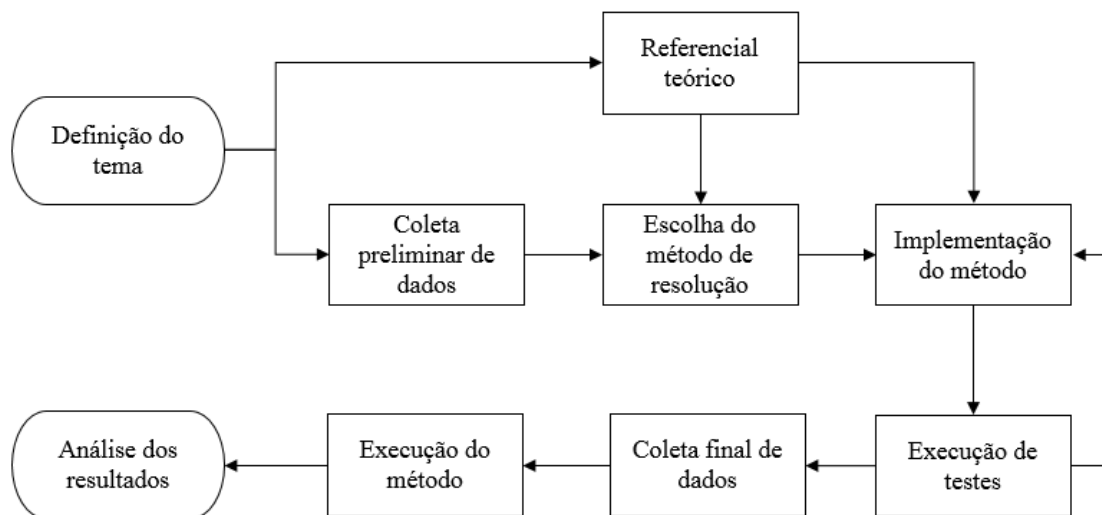
A etapa de coleta preliminar de dados se deu por entrevistas com funcionários das empresas operadoras e a coleta de uma amostra da agenda (lista de solicitações) de um dia de atendimento. Essa etapa proporcionou uma ampla visão dos desafios do Transporte Eficiente e auxiliou no direcionamento do referencial teórico e da escolha do método de resolução.

Posteriormente, iniciou-se a implementação do método escolhido, a meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS), que foi implementada em linguagem de programação C#. Essa

meta-heurística foi escolhida por ser um dos métodos com eficiência comprovada em resolver instâncias do DARP, conforme será detalhado no capítulo de referencial teórico. Após a escolha e implementação do método, utilizou-se a amostra de agendamento da coleta preliminar como base para avaliar a suficiência dos dados e os tratamentos necessários.

Por fim, a coleta final dos dados consistiu na solicitação de amostras adicionais para melhor avaliação dos resultados. Finalizando, realizaram-se testes e a análise dos resultados possibilitando identificar as limitações do método e propor recomendações para trabalhos futuros. Todas as etapas executadas estão ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Etapas de pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor

1.4 JUSTIFICATIVAS

De acordo com o Relatório Mundial Sobre Deficiência da Organização Mundial de Saúde (OMS) mais de um bilhão de pessoas em todo o mundo convivem com alguma forma de deficiência, dentre os quais cerca de 200 milhões experimentam dificuldades funcionais consideráveis. A deficiência tende a se tornar uma preocupação cada vez maior dado que sua incidência está altamente relacionada com o envelhecimento da população e doenças crônicas como a diabetes, câncer, doenças cardiovasculares e distúrbio mentais (OMS, 2012).

As pessoas com deficiência com renda familiar abaixo de cinco salários mínimos são beneficiárias da gratuidade no transporte público na cidade de Joinville de acordo com o Decreto Municipal nº 9933/01 que regulamentou a Lei nº 4288/00. A gratuidade pode ser válida

permanentemente ou temporariamente de acordo com laudo médico e, em caso de dependência, um acompanhante também ganha a gratuidade (JOINVILLE, 2000). Grande parte dos beneficiários dessa gratuidade são também usuários do Transporte Eficiente, serviço cujo custo é incorporado à tarifa convencional, ou seja, rateado entre os usuários pagantes. Sendo assim, a redução do custo desse serviço, sem perda de qualidade e conforto, traria benefícios para o sistema como um todo, seja na forma de redução da tarifa ou com melhoria dos serviços.

Segundo Ferraz e Torres (2004), o custo do transporte público coletivo pode superar o custo de outros serviços básicos, como o abastecimento de água, por exemplo. Sendo assim, torna-se imprescindível que a empresa operadora de transporte público busque constantemente a eficiência econômica do serviço, que na sua definição mais simples é atingir um custo mínimo dado um padrão de qualidade do serviço. É neste contexto que um estudo de roteirização e de veículos nas empresas operadoras do Transporte Eficiente em Joinville pode ser útil econômica e socialmente.

Segundo Bodin et al. (1983), a minimização de custo, seja através da redução da distância ou de outros fatores é, em geral, o objetivo dos problemas de roteirização e de veículos. No entanto, os autores também destacam que, no contexto da prestação de serviços públicos, a minimização de custo pode não ser o foco principal de uma operação. Em um serviço de transporte escolar, por exemplo, o objetivo será reduzir o tempo que os estudantes permanecem dentro do ônibus tendo em vista, assim, a segurança. O problema do transporte especial de cadeirantes não é diferente, além da diminuição do tempo de permanência do usuário no veículo, pode-se também ter como objetivo um melhor aproveitamento da frota.

Além da escolha da função objetivo que melhor represente as necessidades reais do problema, Kaiser (2009) também aponta que a resolução de problemas de roteirização, em geral, não é simples, pois mesmo variações pequenas na sua configuração podem levar a formulações matemáticas diferentes, ou até a necessidade de outro método de solução. Não foi encontrado na bibliografia levantada um método que seja unânime na resolução do DARP e sim muitas tentativas, na sua maioria testadas em instâncias artificiais. Sendo assim, a relevância acadêmica desse trabalho está em resolver uma situação real do DARP com um método já desenvolvido e validado a fim de propor uma nova configuração das rotas de atendimento do Transporte Eficiente em Joinville.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em seis capítulos iniciando por este introdutório. O

capítulo dois trata do referencial teórico sobre os sistemas de transporte público, mais especificamente sobre os sistemas especiais voltados a pessoas com deficiência. O capítulo seguinte apresenta o referencial teórico sobre problemas de roteirização de veículos, voltando-se mais especificamente para o Problema *dial-a-ride*. O quarto capítulo apresenta o delineamento do estudo de caso, considerando o serviço prestado pelas duas empresas concessionárias em toda a extensão da cidade de Joinville. No quinto capítulo é realizada a análise dos resultados obtidos e, por fim, no sexto capítulo apresentam-se as considerações finais do trabalho e as recomendações a trabalhos futuros.

2. TRANSPORTE PÚBLICO PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

Tendo em vista a importância do transporte público na inclusão social das pessoas com deficiência, neste capítulo será apresentado um panorama desse tipo de transporte no Brasil e uma contextualização de sistemas especialmente dedicado a esse público. Em seguida, são destacados alguns exemplos de outras cidades que implantaram sistemas similares ao de Joinville. Espera-se ao final deste capítulo ter compreensão sobre esse serviço e sua importância, possibilitando a sua posterior modelagem.

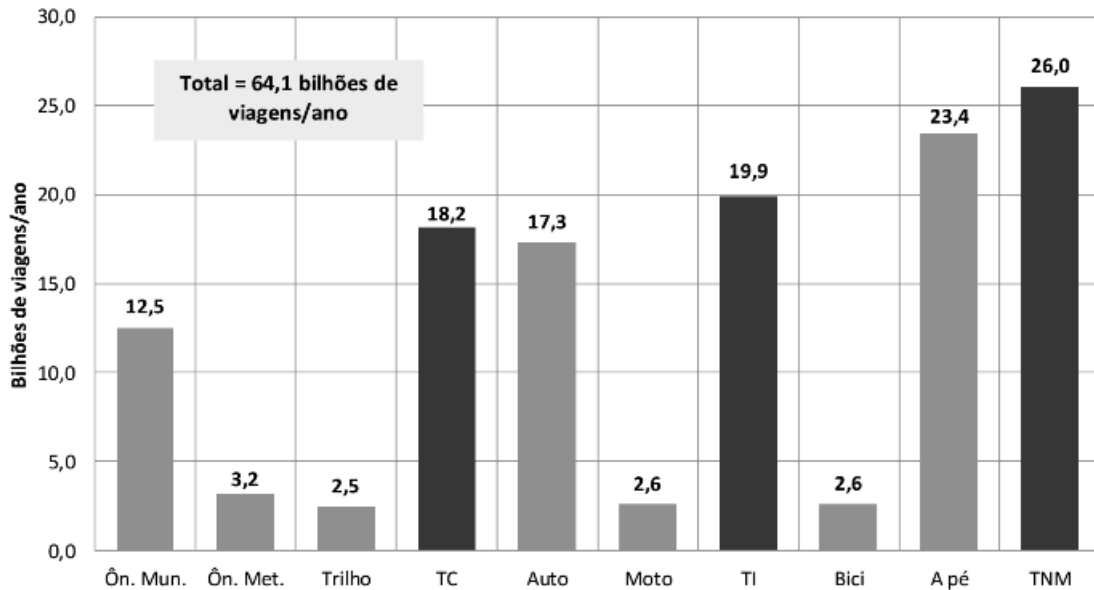
2.1 TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

Os centros das cidades, por concentrarem atividades econômicas, são um polo de atração e distribuição de viagens a trabalho, lazer, estudos e outros fins. Esse constante movimento transformou o transporte em algo imprescindível para a população (SILVEIRA, 2012). Transporte é deslocamento de pessoas e de produtos e envolve, não apenas o veículo, mas todo o ambiente entre uma origem e um destino.

Silveira (2012) afirma de forma simples que o transporte público é destinado a qualquer pessoa enquanto o privado é de direito apenas daquele que o adquiriu. Ou seja, o transporte público abrange todas as formas de transporte que estão disponíveis a todos inclusive o simples andar a pé em uma calçada. Ferraz e Torres (2004) também definem que o transporte, quando compartilhado por várias pessoas é chamado de coletivo ou de massa como é o caso do transporte por ônibus, trem e metrô. O transporte por ônibus é então uma forma de transporte público coletivo enquanto os táxis operam um transporte público individual.

No Brasil, o principal modo utilizado no transporte público coletivo é o ônibus, fato que pode ser observado no gráfico apresentado pela Figura 2 onde, de um total de 64,1 bilhões de viagens/ano, 18,2 bilhões são realizadas de Transporte Coletivo (TC) e desses, 12,5 bilhões são realizadas em ônibus municipais. Os outros modos principais considerados são Transporte Não Motorizado (TNM) e Transporte Individual (TI). O levantamento é realizado anualmente pela Agência Nacional de Transportes Públicos (ANTP) e leva em consideração municípios acima de 60 mil habitantes.

Figura 2 – Viagens (em bilhões) realizadas em 2014, por modo principal



Fonte: ANTP (2016)

O transporte público, como um serviço público delegado através de concessão está submetido ao regime de direito público e deve obedecer uma série de princípios. De acordo com Anjos (2017) são eles:

- a) Regularidade: deve ser ofertado de forma regular;
- b) Eficiência: os serviços devem ser prestados com a maior eficiência possível;
- c) Continuidade: os serviços não devem sofrer interrupção;
- d) Generalidade: também conhecido como universalidade, dispõe que os serviços devem ser prestados de forma a beneficiar o maior número de pessoas e sem discriminação;
- e) Atualidade: pode ser considerada uma extensão da eficiência e dispõe que os serviços devem ser constantemente atualizados;
- f) Segurança: o serviço não pode colocar em risco a vida dos administrados;
- g) Modicidade: os serviços devem funcionar sob a tarifa mais baixa possível;
- h) Cortesia: o prestador de serviço deve ser cortês e educado na execução de suas funções.

Outros princípios são também aplicáveis no caso específico do transporte segundo Guia de Direitos (2017). São eles:

- a) Obrigatoriedade: o Estado tem obrigação de garanti-lo de forma direta ou indireta;
- b) Previsibilidade: as rotas e os pontos de parada devem ser respeitados;

- c) Conforto: os veículos devem oferecer condições de transportar passageiros com comodidade;
- d) Acessibilidade: os veículos e a infraestrutura devem atender pessoas com deficiência ou mobilidade reduzida;
- e) Controle: deve-se estabelecer uma forma de garantir o cumprimento dos princípios.

O setor de transporte público, no Brasil, tem sofrido uma queda de 2% ao ano na demanda e entre os anos de 2014 e 2015 a perda de passageiros chegou à 9% (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU), 2016). Em Joinville, uma queda no número de usuários por ano também vem acontecendo desde 2012 e foi mais acentuada no ano de 2015 quando chegou a 4,27% em relação ao ano de 2014 (FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE JOINVILLE (IPPUJ), 2016). A Tabela 1 ilustra a evolução nos indicadores de passageiros transportados desde 2010 na cidade.

Tabela 1 – Indicadores do sistema de transporte público de Joinville

Ano	Passageiros Transportados	Quilometragem	Frota	Passageiro por Veículo	Passageiro por Km
2010	46.758.734	22.648.734	355	131.715	2,06
2011	46.961.467	22.734.394	354	132.660	2,07
2012	45.869.400	22.260.912	354	126.575	2,06
2013	44.430.121	22.793.723	362	122.735	1,95
2014	43.814.652	22.867.822	364	120.370	1,92
2015	41.941.844	22.471.451	364	115.225	1,87

Fonte: Adaptado de IPPUJ (2016)

Essa queda pode ser explicada de diversas formas como: falta de qualidade do serviço, aspectos culturais, incentivo na compra de automóveis, entre outros. A qualidade do serviço está atrelada a vários fatores como, por exemplo, o tempo gasto nos deslocamentos que é muito maior no transporte público segundo pesquisa da ANTP realizada em municípios com mais de 60 mil habitantes. Nestas cidades os habitantes gastam, por ano, 22,8 bilhões de horas para deslocar-se e a maior parte é gasta nos veículos de transporte público (49%), seguido pelas viagens a pé (26%). Considerando que o transporte público representa 29% do total das viagens e consome 49% do total de tempo na mobilidade, fica claro que o usuário deste modo está sujeito a tempos médios de viagem superiores (ANTP, 2016).

Em 2015, uma Proposta de Emenda à Constituição (PEC) 90/2011 tornou o transporte público um direito social. Para a NTU, essa mudança proporciona ao setor o argumento jurídico

necessário para a criação de uma fonte de recursos para financiar o transporte público, pois o modelo atual, sustentado pelas tarifas, está ultrapassado e ineficiente (NTU, 2016). O serviço de transporte público lida diariamente com objetivos opostos: por um lado o valor da tarifa precisa respeitar a princípio da modicidade e por outro precisa buscar melhorar seu nível de conforto. O transporte público especial para pessoas com deficiência, a ser descrito na próxima seção, lida ainda com o objetivo de proporcionar acessibilidade para pessoas onde o sistema convencional não é suficiente.

2.2 TRANSPORTE PÚBLICO ESPECIAL PARA PESSOAS COM DEFICIÊNCIA

2.2.1 Conceitos e legislação específica

Antes de abordar a legislação que levou à criação dos sistemas especiais de transporte, cabe aqui definir alguns conceitos de forma mais clara. O termo utilizado para se referir às pessoas com deficiência mudou com o passar do tempo e ainda é tema de constante discussão. Sendo assim, por mais que alguns textos aqui referidos usem termos diferentes, principalmente devido a suas datas de publicação, neste trabalho estão sendo adotados os termos “pessoa com deficiência” e “pessoa com mobilidade reduzida”, ambos conceituados a seguir.

O termo “pessoa com deficiência” é definido pela ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) (2009, p.2) como a pessoa “[..] que apresenta perda ou anormalidade de uma estrutura ou função psicológica, fisiológica ou anatômica, que gere limitação ou incapacidade para o desempenho de atividade”. Já a pessoa com mobilidade reduzida é definida pelo mesmo texto como “aquela que, não se enquadrando no conceito de pessoa com deficiência, tenha, por qualquer motivo, dificuldade de movimentar-se permanente ou temporariamente, gerando redução efetiva de mobilidade, flexibilidade, coordenação motora e percepção”.

Outro esclarecimento a ser feito é em relação à acessibilidade que possui conceituação diferente dependendo da área de conhecimento em que se está trabalhando. Em se tratando de transporte, pode existir a acessibilidade física dos equipamentos ou a facilidade de se atingir um destino a partir de uma origem (SILVEIRA, 2012). A acessibilidade aqui tratada é da primeira forma, mas além de física é social, pois se relaciona com o princípio da acessibilidade dos serviços públicos e com o direito ao exercício da cidadania garantido pela Constituição.

Quanto à legislação brasileira que levou à criação dos transportes especiais, além da própria Constituição, destaca-se o Decreto nº 5.296 de 2004 que regulamentou as Leis Federais

510.048/00 e 510.098/00. Essas leis tratam, respectivamente, do atendimento prioritário e das normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida (BRASIL, 2006a). Segundo o capítulo V do decreto supracitado os sistemas de transporte coletivo são considerados acessíveis quando todos os seus elementos são concebidos, organizados, implantados e adaptados segundo o conceito de desenho universal, garantindo o uso pleno com segurança e autonomia por todas as pessoas (BRASIL, 2004).

Em se tratando do transporte rodoviário, o decreto previu a substituição gradativa, em até 10 anos, da frota de transporte público ao obrigar que a fabricação de novos veículos seja feita de acordo com norma específica (BRASIL, 2004). E também estabeleceu oportunidades e deu condições para o desenvolvimento de uma política nacional de acessibilidade, fazendo parte de uma base jurídica que dá suporte às cidades na implantação de ações destinadas à garantia da acessibilidade. Além dele, o Estatuto das Cidades e o respectivo Plano Diretor Municipal possuem papel fundamental na construção de cidades acessíveis e inclusivas (BRASIL, 2006b).

Os transportes que funcionam porta-a-porta complementando os sistemas convencionais não são obrigatórios e são geralmente criados através de legislação municipal como forma de amenizar problemas de acessibilidade. De acordo com Wright (2001) a criação de sistemas especiais de transporte para pessoas com deficiência teve início nas dificuldades encontradas em atingir o ponto de equidade de acesso aos equipamentos de transporte, ou seja, da garantia da acessibilidade do sistema.

A preocupação com a mobilidade das pessoas com deficiência existe também em outros países. Nos Estados Unidos, a declaração dos direitos das pessoas com deficiência foi feita através da *American with Disabilities Act* (ADA). A declaração foi assinada em 1990 e tem como objetivo proibir discriminações e garantir oportunidades de trabalho, e participação em programas do governo e locais (ESTADOS UNIDOS, 2017). A ADA traz algumas exigências em relação aos serviços de transporte público como cumprir requisitos de acessibilidade dos veículos e quando isso não for possível ofertar sistemas separados chamados de *paratransit systems* (ESTADOS UNIDOS, 2009).

Na Europa os estudos em torno da acessibilidade dos transportes públicos existem desde os anos 1970 e além de ofertar serviços especiais tem-se trabalhado para substituí-los pelo uso do sistema convencional projetado com desenho universal. Ainda assim os sistemas especiais seriam uma opção para casos extremos ou que precisam de acompanhamento médico (WRIGHT, 2001).

2.2.2 Exemplos no Brasil de transporte público especial para pessoas com deficiência

Além da cidade de Joinville, estudada nesse trabalho, muitas outras cidades possuem sistemas porta-a-porta para atender pessoas com mobilidade reduzida. Embora no Brasil esses sistemas sejam implementados para atender legislação federal, os procedimentos de uso, bem como as regras de quem pode utilizar ou não são determinados, geralmente, por regulamentação municipal. Por isso, algumas diferenças são notadas de um exemplo a outro, como quem opera o serviço, quais tipos de veículos são utilizados, funcionamento do agendamento, quem está habilitado a usar, quais são os níveis de serviço aplicados e se existe gratuidade ou não.

Em Vitória – ES, um serviço especial gratuito para transporte de cadeirantes existe desde 2000 e é chamado de Serviço Especial Mão na Roda ou apenas Mão na Roda. Em 2010, o serviço passou a ser operado por um consórcio de empresas que atua na região metropolitana de Vitória e o gerenciamento fica a cargo da Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória (CETURB/GV). Em 2015, o serviço, que possui cerca de 2.700 usuários cadastrados, transportou mais de mil usuários nos 25 veículos que compõem a frota (SINDICATO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE METROPOLITANO DA GRANDE VITÓRIA (GVBUS), 2017 e FRAGA NETO, 2015).

Em Campinas – SP, o Programa de Acessibilidade Inclusiva (PAI) fornece serviço de transporte porta-a-porta e porta-a-ponto de ônibus através do PAI-Serviço. O sistema tem 47 vans e 2 ônibus acessíveis além de também utilizar a frota acessível do sistema convencional de transporte público. Podem utilizar esse serviço pessoas com restrição severa de mobilidade, que utilizem cadeira de rodas ou andador para se locomover (EMPRESA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO DE CAMPINAS (EMDEC), 2017)

Em São José dos Campos – SP, o serviço porta-a-porta através de vans adaptadas é oferecido gratuitamente desde 1999 pela Secretaria de Transportes do município para pessoas com mobilidade reduzida severa. Os usuários precisam fazer um credenciamento e passar por avaliação médica (FARIA et al., 2010; SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, 2017)

A capital paulista também possui um serviço especial chamado de Serviço de Atendimento Especial, ou simplesmente Atende, destinado a atender pessoas com deficiência que estejam dependentes do uso da cadeira de rodas. Foi criado em 1996 e é oferecido pela prefeitura, gerenciado pela São Paulo Transporte S.A. (SPTRANS) e operado pelas empresas de transporte coletivo do município de São Paulo com veículos do tipo van devidamente adaptados e percorrem cerca de um milhão de quilômetros por mês. O atendimento é prestado a clientes cadastrados com uma programação pré-agendada de viagens e aos fins de semana

funciona para eventos vinculados a associações cadastradas (SPTRANS, 2016). Durante o ano de 2013, o Atende realizou mais de 1,3 milhões de viagens percorrendo 16,9 milhões de quilômetros com 388 veículos (SÃO PAULO, 2014).

Uma parceria do Atende com empresas de táxi foi anunciada em 2014 e passou a funcionar em 2015. Táxis acessíveis da cidade foram contratados através de licitação para auxiliar no atendimento das vans e suprir uma demanda não atendida de quase 1000 usuários. A viagem é gratuita para o usuário, assim como o Atende e é destinada às pessoas que solicitam viagens de forma esporádica (SÃO PAULO, 2014; REVISTA EXAME, 2015).

No Rio de Janeiro – RJ, foi criado no final de 2004, um serviço de transporte especial de passageiros que funciona como táxi. Uma cooperativa de táxi foi contratada como concessionária do serviço e oferece 50 carros adaptados com elevadores para clientes que dependem de cadeira de rodas. Um cliente pode fazer um cadastro permanente ou solicitar viagens esporadicamente e a tarifa cobrada é igual à tarifa dos táxis convencionais (BRASIL, 2006b; ESPECIAL COOP, 2017). Esse serviço do Rio de Janeiro é diferente dos outros, pois não se caracteriza como coletivo, além de os táxis possuírem uma tarifa menos acessível.

Os exemplos aqui levantados demonstram que o transporte especial para pessoas com deficiência no Brasil teve seu início no fim da década de 90 e cresceu significativamente desde então. Essa é uma demonstração do efeito das discussões recentes sobre o direito das pessoas com deficiências que as levaram a conquistar lugar ativo na sociedade. No próximo capítulo será estudada a modelagem desse tipo de transporte (porta-a-porta) dentro do contexto da Pesquisa Operacional.

3. ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS - O PROBLEMA *DIAL-A-RIDE*

Esse capítulo tem o objetivo de apresentar a definição e classificação dos problemas de roteirização de veículos, e um enfoque no problema *dial-a-ride*, para o qual serão analisados alguns modelos e métodos de solução já estudados por outros autores. Espera-se, ao final desse capítulo, ter uma ampla fundamentação teórica que permita a escolha do método de solução para o estudo de caso do presente trabalho.

3.1 PROBLEMAS DE ROTEIRIZAÇÃO DE VEÍCULOS

3.1.1 Definição

No contexto da distribuição e do transporte, as decisões estão divididas entre os três níveis de planejamento: estratégico, tático e operacional. No nível estratégico estão as decisões relacionadas à localização de estruturas como fábricas e armazéns, já a determinação do tamanho e da composição da frota pode ser considerada de nível tático. No nível operacional, as requisições diárias se concentram em decidir rotas a serem percorridas e programação de frota e pessoal (BODIN et al., 1983). As decisões do nível operacional podem ser auxiliadas pelo ramo da PO chamado roteirização de veículos.

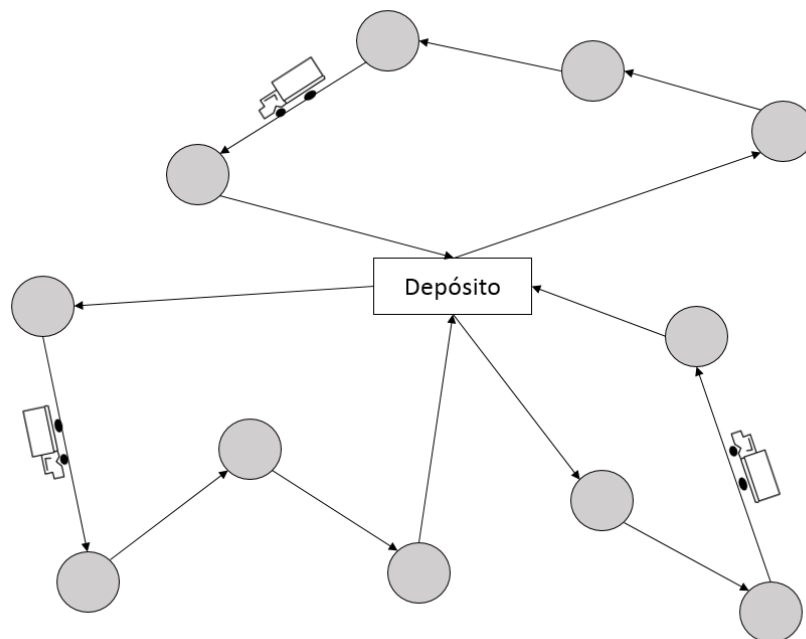
Goldberg e Luna (2000) definem a roteirização de veículos como sendo o problema cujo objetivo é visitar uma série de clientes ao menor custo possível e atender simultaneamente todas as imposições do problema. Para Toth e Vigo (2014), a definição dessa classe de problemas é: dado um conjunto de requisições de transporte e uma frota de veículos, encontrar um conjunto de rotas para atender todas ou algumas requisições com a frota disponível a um custo mínimo e de forma exequível. Apesar de essencialmente operacional, a roteirização pode ser aplicada a casos de natureza tática ou estratégica, conforme destacado por Cunha (2000), em situações onde, por exemplo, a definição de roteiros está atrelada a decisões de localização de armazéns ou aos níveis de estoque.

Para entender os PRVs, é importante definir o Problema do Caixeiro Viajante (PCV), que consiste em encontrar a sequência de cidades a serem visitadas por um caixeiro viajante

que minimize a distância percorrida, que não repita nenhuma cidade e retorne ao início da rota. Foi a partir do PCV que os problemas de roteirização de veículos se desenvolveram, com a inclusão de mais restrições, como horários de atendimento e capacidade dos veículos, ou outras generalizações (CUNHA, 2000).

O Problema de Roteirização de Veículos Capacitados, por exemplo, consiste no atendimento de n requisições de transporte com demanda q_i para $i = \{1, \dots, n\}$ a partir de um único depósito, utilizando uma frota de m veículos homogêneos com capacidade máxima Q_k para $k = \{1, \dots, m\}$. O problema consiste em agrupar um conjunto factível de requisições para cada veículo considerando a restrição de capacidade, para em seguida construir o roteiro de cada veículo buscando minimizar o custo total (TOTH; VIGO, 2014). A Figura 3 contém uma ilustração desse problema, onde cada ponto cinza representa uma requisição com demanda $q=1$ e cada veículo possui capacidade $Q=4$.

Figura 3 – Ilustração do Problema de Roteirização de Veículos Capacitados



Fonte – Elaborado pelo autor

Alguns outros exemplos de variações importantes dos PRVs (TOTH; VIGO, 2014):

- Problema de Roteirização de Veículos com Múltiplos Depósitos;
- Problema de Roteirização em Arcos;
- Problema Dinâmico de Roteirização de Veículos;
- Problema de Roteirização de Veículos com Janelas de Tempo;

- Problema de Coleta e Entrega;
- Problema de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo;

3.1.2 Classificação

Devido à grande variação dos PRVs, tornou-se importante o uso de métodos de classificação que permitam localizar facilmente a melhor representação do problema real através de suas características ou objetivo principal. Em Bodin et al. (1983), um dos trabalhos mais importantes e abrangentes da roteirização de veículos, foi proposto uma classificação que divide os problemas em três grandes grupos. São eles:

- a) Os *problemas de roteirização* definidos por um conjunto de nós ou arcos a serem visitados por uma frota de veículos sem restrições temporais;
- b) Os *problemas de programação* possuem restrições que envolvem o tempo ou sequenciamento de tarefas a serem executadas;
- c) Os *problemas combinados* quando existem janelas de tempo e/ou relações de precedência nos pontos a serem visitados e ambos, roteamento e programação, precisam ser otimizados.

Além disso, para um melhor entendimento dos problemas reais em estudo, pode-se fazer um levantamento de seus comportamentos de acordo com algumas características ou aspectos do problema. Em Bodin e Golden (1981), foi proposta uma lista dessas características e suas variações que estão apresentadas no Quadro 1. Por exemplo, um problema com uma única garagem e um único veículo, demanda determinística e localizada nos nós, e objetivo de minimizar a distância total percorrida forma o clássico PCV.

Quadro 1 – Características dos PRVs e suas variações

Características	Variações
Tempo para servir um determinado nó	<ul style="list-style-type: none"> • Tempo especificado ou prefixado; • Janela de tempo.
Número de garagens	<ul style="list-style-type: none"> • Uma garagem; • Mais de uma garagem.
Tamanho da frota de veículos	<ul style="list-style-type: none"> • Um veículo; • Mais de um veículo.
Tipo da frota disponível	<ul style="list-style-type: none"> • Homogênea; • Heterogênea.
Natureza da demanda e parâmetros	<ul style="list-style-type: none"> • Determinística; • Estocástica.
Localização da demanda	<ul style="list-style-type: none"> • Nos vértices; • Nos arcos.

Características	Variações
Grafo de substrato	<ul style="list-style-type: none"> • Direcionado; • Não direcionado; • Misto.
Restrições na capacidade de veículos	<ul style="list-style-type: none"> • Todos sujeitos às mesmas restrições; • Restrições diferentes.
Tempo de roteamento	<ul style="list-style-type: none"> • O mesmo para todos os veículos; • Tempos diversos; • Sem restrições de tempo.
Custos	<ul style="list-style-type: none"> • Variáveis (associados à rota escolhida); • Fixos.
Operação	<ul style="list-style-type: none"> • De entrega; • De recolhimento; • Ambas.
Objetivo	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar custos fixos; • Minimizar custos de operação na rota; • Minimizar o número de veículos.
Restrições na capacidade dos arcos	<ul style="list-style-type: none"> • Imposta a todos os arcos; • Impostas a um subconjunto de arcos; • Sem restrições.

Fonte: Adaptado de Bodin e Golden (1981)

Em Toth e Vigo (2014), também é apresentada uma classificação de acordo com as características onde são considerados seis aspectos dos problemas conforme mostrado abaixo.

a) Estrutura da rede:

- Nós ou arcos;
- Previamente conhecida ou não.

b) Tipo das requisições de transporte:

- Coleta ou entrega;
- Visita agendada;
- Entregas alternativas ou indiretas;
- Ponto a ponto;
- Entregas periódicas;
- Entrega parcelada;
- Apenas requisições selecionadas;
- Dinâmicas e estocásticas.

c) Restrições das rotas:

- Carga;
- Duração;
- Quantidade de veículos;

- Janelas de tempo.
- d) Características da frota:
- Múltiplos depósitos;
 - Heterogeneidade;
 - Veículos extensíveis ou acoplados.
- e) Restrições globais:
- Número de veículos;
 - Sincronizações.
- f) Objetivo:
- Único objetivo;
 - Hierarquia de objetivos;
 - Multiobjetivo.

O problema *dial-a-ride*, a ser tratado nesse trabalho, se classifica como um problema combinado, também conhecido como Problema de Roteirização e Programação de Veículos (PRPV). Na próxima seção será apresentada a definição do DARP, os principais métodos de resolução conhecidos e uma formulação matemática.

3.2 PROBLEMA *DIAL-A-RIDE*

3.2.1 Definição

De acordo com Madsen, Ravn e Rygaard (1995) e Cordeau (2006), no DARP se tem um conjunto de clientes que informam uma localização de origem (ponto de coleta) e uma de destino (ponto de entrega), um horário desejado de coleta ou de entrega e o tipo de transporte necessário. Um número de veículos com capacidade definida também é conhecido. O objetivo, segundo Cordeau (2006), é otimizar a rota e a programação para cada veículo de modo a atender todos os clientes reduzindo a quilometragem percorrida e atendendo às restrições.

O DARP pode ser considerado um Problema de Coleta e Entrega com Janelas de Tempo, mas com o diferencial de aplicação ao transporte de pessoas (TOTH; VIGO, 2014). A primeira e principal restrição desse tipo de problema trata da relação de precedência entre os pontos de coleta e entrega, onde um cliente não pode ser entregue sem antes ter sido coletado. Essa restrição dificulta ou impede o uso de métodos de resolução já conhecidos para os PRVs (BODIN et al., 1983; ZNAMENSKI; CUNHA, 1999). A Figura 4 apresenta um exemplo de roteiro com programação para um problema genérico de coleta e entrega onde, para cada

cliente, existem duas atividades: coleta e entrega, e a primeira deve sempre vir antes da segunda. Observa-se também que as duas atividades podem ser executadas uma imediatamente depois da outra ou podem ser realizadas coletas de vários clientes (respeitando a capacidade do veículo) antes de fazer a entrega de todos (seguida ou não).

Figura 4 – Exemplo de roteiro e programação de coleta e entrega

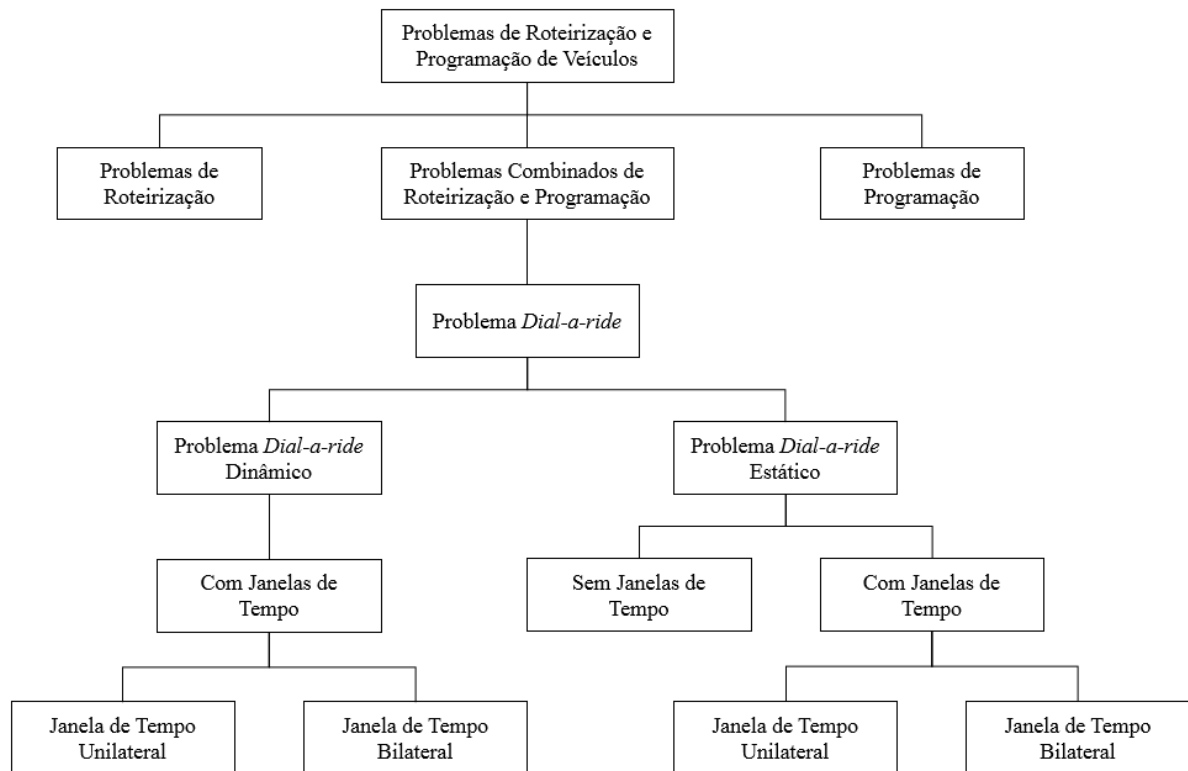
<u>Local</u>	<u>Atividade</u>	<u>Número do cliente</u>	<u>Horário</u>	<u>Quantidade no veículo</u>
3405 Powhatan Avenue	Coleta	25	12:00	1
2401 Strickland Street	Entrega	25	12:15	0
861 Park Avenue	Coleta	26	13:45	1
5604 Woodmont Avenue	Entrega	26	14:10	0
1111 E. Coldspring Avenue	Coleta	51	16:24	1
1111 E. Coldspring Avenue	Coleta	48	16:24	2
1111 E. Coldspring Avenue	Coleta	47	16:24	3
1600 Mount Royal Avenue	Entrega	47	16:56	2
301 McMechen Street	Entrega	48	17:00	1
1032 W. Franklin Street	Entrega	50	17:12	0

Fonte: Adaptado de Bodin et al. (1983)

As requisições de transporte do DARP podem ser conhecidas com antecedência, e nesse caso o problema é chamado estático, ou podem ser recebidas gradativamente enquanto o roteiro já está em andamento e, nesse caso, é chamado dinâmico (CORDEAU, 2006). Com base no trabalho de Bodin et al. (1983), a Figura 5 ilustra uma classificação mais detalhada desses dois casos do DARP inseridos no contexto dos PRPVs.

O DARP sem janelas de tempo possui pouca aplicação real no transporte de passageiros, sendo assim, o caso mais amplo que contém restrições do tipo janela de tempo. Considerando a imposição de janelas de tempo bilaterais, tem-se que uma visita, serviço ou tarefa deve ocorrer dentro de intervalo $[e, l]$. Já as janelas de tempo unilaterais são do tipo $[-\infty, l]$ ou $[e, +\infty]$, ou seja, o serviço deve acontecer antes ou depois de um tempo específico (BODIN et al., 1983).

Figura 5 - Classificação do DARP em relação aos Problemas de Roteirização de Veículos



Fonte: Adaptado de Bodin et al. (1983)

É comum nos sistemas de transporte de pessoas, que podem ser descritos pelo DARP, os usuários fazerem duas requisições de transporte, uma que o leva de seu domicílio até um destino (ida) e outra para o retorno ao domicílio (volta). O usuário de um serviço *dial-a-ride* deve especificar um desejo de horário de chegada no local de destino para viagens de ida (janela unilateral como limite superior) ou de horário de partida para viagens de volta (janela unilateral com limite inferior) (CORDEAU, 2006). Muitos trabalhos como o de Jaw et al. (1986) e Cordeau (2006), no entanto consideram uma largura padrão de janela de tempo e um tempo máximo de viagem tornando possível definir limites inferiores e superiores para a coleta ou entrega do usuário (janela bilateral).

Por exemplo, considerando uma janela de tempo de 15 minutos e um tempo máximo de viagem de 60 minutos, um usuário que deseja chegar ao seu destino às 9:00h não será coletado antes de 7:45h e, será entregue no destino entre 8:45h e 9:00h. No entanto, repare que essa configuração não garante que o tempo máximo da janela seja respeitado pois o usuário pode ser coletado às 7:45h e entregue às 9:00h sendo necessário também manter uma restrição para limite de tempo de viagem.

Além da relação de precedência e da imposição de janelas de tempo, o DARP sofre

restrições quanto à capacidade dos veículos, que podem ser homogêneos ou heterogêneos (capacidades diferentes) ou ainda possuir diferentes formas de ocupação (cadeira de rodas, assentos normais, macas), quanto ao tempo máximo de duração da rota, tempo máximo de duração da viagem de cada usuário e tempo máximo de espera do veículo (BABA et al., 2004; TOTH; VIGO, 2014).

Quanto ao objetivo do DARP, assim como em outros problemas que envolvem passageiros, existem dois objetivos conflituosos: minimizar o custo operacional e minimizar a inconveniência dos usuários. Os custos operacionais estão relacionados com o tamanho da frota, a distância viajada e o tempo total gasto, enquanto a inconveniência é medida pelos desvios no tempo de coleta e entrega desejados e pelo excesso de tempo de viagem de cada cliente (BODIN et al., 1983; CORDEAU, 2006).

Um modo de balancear esses dois objetivos é tratar o custo operacional como objetivo principal e impor restrições relacionadas às inconveniências, método usado por Znamenski e Cunha (1999) e Cordeau (2006). Outro método foi abordado por Psarafits (1980, 1983) e Mauri e Lorena (2009) que usaram a minimização de uma ponderação entre o custo operacional e as inconveniências do usuário.

3.2.2 Formulação matemática

Será apresentada nessa subseção a formulação matemática desenvolvida por Mauri (2008) que foi baseada nos modelos de Cordeau (2006) e Bergvinsdottir (2004).

A formulação de Cordeau (2006) foi construída para o DARP estático, múltiplos veículos, frota homogênea e garagem única. A função objetivo apresenta a minimização de um custo c_{ij} relacionado à distância total percorrida ou ao tempo total percorrido. O autor também propôs uma formulação simplificada com redução de variáveis e eliminação de arcos. No entanto, Mauri (2008) destaca a inaplicabilidade do modelo de Cordeau (2006) em situações reais devido a sua consideração de frota homogênea e garagem única e também pela simplicidade do objetivo.

Bergvinsdottir (2004) também trata em seu modelo o DARP estático com múltiplos veículos, mas com frota heterogênea (cada veículo possui capacidade distinta) e garagens múltiplas. A função é multiobjetivo e busca minimizar o custo total de transporte, representado pelo tempo de viagem entre os locais, número de veículos utilizados e a duração das rotas, e também a inconveniência dos usuários representada pelo tempo total de viagem e de espera de

cada cliente. Na função, cada termo é multiplicado por um número inteiro que representa o peso de cada objetivo na soma final. Esse modelo não faz nenhuma redução de variável ou arcos, mas é uma melhor representação da realidade.

Por fim, o modelo proposto por Mauri (2008) também considera o DARP estático com múltiplos veículos, frota heterogênea e garagens múltiplas com cada veículo partindo e retornando à mesma garagem e, uma função multiobjetivo.

Para a apresentação da formulação matemática cabe algumas definições. Assume-se n clientes solicitando atendimento a ser realizado por m veículos disponíveis. Um cliente faz uma requisição de transporte informando um ponto i de embarque, e outro, $n + i$, de desembarque. Tem-se então os seguintes conjuntos:

- K : conjunto de veículos disponíveis ($|K| = m$);
- G^- : conjunto de garagens de origem;
- G^+ : conjunto de garagens de destino;
- P : conjunto de locais de embarque;
- U : conjunto de locais de desembarque;
- $N = \{G^- \cup P \cup U \cup G^+\}$: conjunto de todos os locais (pontos).

Cada cliente deve informar uma carga q_i a ser transportada e uma janela de tempo $[e_i, l_i]$ para o ponto de embarque e uma janela $[e_{i+n}, l_{i+n}]$ para o ponto de desembarque. A carga será um número inteiro positivo nos pontos de embarque e o mesmo valor, porém negativo nos pontos de desembarque. Para cada ponto de embarque também será associado um tempo máximo de viagem R''_i , que representa o tempo máximo que o cliente deve permanecer dentro do veículo e para cada ponto de embarque e desembarque é atribuído um tempo máximo de espera W''_i , que representa o tempo que o veículo aguarda para realizar o serviço no local caso chegue antes do limite inferior da janela de tempo. O serviço no local de embarque ou desembarque também possui um tempo de duração s_i .

Cada veículo k possui uma capacidade máxima Q''_k , um tempo máximo de duração T''_k associado à sua rota, bem como uma garagem de origem g_k^- e uma de destino g_k^+ , podendo ser a mesma ou não. Por fim, tem-se as distâncias e tempos de viagem entre um ponto e outro da rota, representados respectivamente por $d_{i,j}$ e $t_{i,j}$.

Cabe também definir as variáveis que irão representar o roteiro e a programação final no modelo para cada veículo $k \in K$:

- A_i : horário de chegada no local i ($\forall i \in N$) sendo $A_i = 0$ se $i \in G^-$ e $A_i = D_{i-1} + t_{i-1,i}$ se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$;

- B_i : horário de início do atendimento no local i ($\forall i \in N$) sendo $B_i = D_i$ se $i \in G^-$ e $B_i = \max\{A_i, e_i\}$ se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$;
- D_i : horário de partido do local i ($\forall i \in N$) sendo $D_i = 0$ se $i \in G^+$ e $D_i = B_i + s_i$ se $i \in \{P \cup U\}$ e $D_i = B_i$ se $i \in G^+$;
- W_i : tempo de espera antes do início do serviço em i ($\forall i \in N$) sendo $W_i = 0$ se $i \in G^-$ e $W_i = B_i - A_i$ se $i \in \{P \cup U \cup G^+\}$;
- Q_i é a ocupação do veículo que atende i ($\forall i \in N$) após o término do serviço, sendo $Q_i = 0$ se $i \in \{G^- \cup G^+\}$ e $Q_i = Q_{i-1} + q_i$ se $i \in \{P \cup U\}$;
- R_i : tempo de viagem do cliente i ($\forall i \in P$), sendo $R_i = B_{n+i} - D_i$;

O modelo se mostra flexível, pois pode representar problemas com diferentes configurações como garagem de desembarque diferente ou igual à de embarque, podendo ser utilizado para frota homogênea e objetivos distintos. A formulação matemática é apresentada pelas Equações (1) a (18) e a variável $x_{i,j}^k = 1$ se o ponto j é visitado imediatamente depois do ponto i pelo veículo k e $x_{i,j}^k = 0$, em caso contrário.

Minimizar:

$$\omega_0 \sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N; j \neq i} (d_{i,j} x_{i,j}^k) + \omega_1 \sum_{k \in K} \sum_{j \in P} x_{g_k^-, j}^k + \omega_2 \sum_{k \in K} (B_{g_k^+} - D_{g_k^-}) + \omega_3 \sum_{i \in P} R_i + \omega_4 \sum_{i \in \{P \cup U\}} W_i \quad (1)$$

$$+ \beta_0 \sum_{k \in K} \max\{0, (B_{g_k^+} - D_{g_k^-}) - T''_k\} + \beta_1 \sum_{i \in P} \max\{0, R_i - R''_i\} + \beta_2 \sum_{i \in \{P \cup U\}} \max\{0, W_i - W''_i\} \quad (2)$$

$$+ \beta_3 \sum_{k \in K} \max\{0, (Q_i \sum_{i \in \{P \cup U\}} \sum_{j \in \{P \cup U\}; j \neq i; j \neq n-i} x_{j,i}^k) - Q_k\} + \beta_4 \sum_{i \in N} (\max\{0, e_i - B_i\} + \max\{0, B_i - l_i\}) \quad (3)$$

Sujeito à:

$$\sum_{j \in \{P \cup \{g_k^+\}\}} x_{g_k^-, j}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{i \in \{U \cup \{g_k^-\}\}} x_{i,g_k^+}^k = 1 \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in \{P \cup U\}; j \neq i} x_{i,j}^k = 1 \quad \forall i \in P \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \{P \cup U\}; j \neq i} x_{i,j}^k - \sum_{j \in \{P \cup U \cup \{g_k^+\}\}; j \neq i; j \neq n+i} x_{n+i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; i \in P \quad (7)$$

$$\sum_{j \in \{P \cup U \cup \{g_k^-\}\}; j \neq i; j \neq n+i} x_{j,i}^k - \sum_{j \in \{P \cup U\}; j \neq i} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; i \in P \quad (8)$$

$$\sum_{j \in \{P \cup U\}; j \neq i} x_{i,j}^k - \sum_{j \in \{P \cup U \cup \{g_k^+\}\}; j \neq i; j \neq n-i} x_{i,j}^k = 0 \quad \forall k \in K; i \in P \quad (9)$$

$$B_j = (B_i + s_i + t_{i,j} + W_j) \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \quad \forall i, j \in N; i \neq j \quad (10)$$

$$Q_j = (Q_i + q_i) \sum_{k \in K} x_{i,j}^k \quad \forall i, j \in N; i \neq j \quad (11)$$

$$A_i = B_i - W_i \quad \forall i \in \{P \cup U \cup G^+\} \quad (12)$$

$$D_i = B_i + s_i \quad \forall i \in \{P \cup U \cup G^-\} \quad (13)$$

$$R_i = B_{n+i} - D_i \quad \forall i \in P \quad (14)$$

$$A_{g_k^-} = D_{g_k^+} = Q_{g_k^-} = Q_{g_k^+} = W_{g_k^-} = 0 \quad \forall k \in K \quad (15)$$

$$A_i, W_i, B_i, D_i, Q_i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$R_i \in \mathbb{R} \quad \forall i \in P \quad (17)$$

$$x_{i,j}^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K; \forall i, j \in N; i \neq j \quad (18)$$

A primeira parte da função objetivo (1) visa minimizar o custo operacional, representado pelas parcelas da distância total percorrida, número de veículos utilizados, tempo total de duração das rotas, o tempo total de viagem dos clientes e o tempo total de espera os veículos. Essas parcelas são chamadas por Mauri (2008) de requisitos não-essenciais. Os requisitos essenciais fazem parte de (2) e (3) da função objetivo e estes são assim chamados pois consideram os limites superiores de tempo que não devem ser ultrapassados e se ultrapassados geram soluções infactíveis. As parcelas representam o tempo que excede o tempo máximo de duração das rotas, o tempo total que excede os tempos máximos de viagem permitidos para os clientes, o tempo que excede o máximo de espera permitido em cada local, o excesso na capacidade dos veículos e o total de tempo que extrapola as janelas de tempo. Os números inteiros positivos $\omega_0, \omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ e $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ são as penalizações de cada

termo e são ajustados conforme a importância de cada um.

Quanto às restrições (4) e (5), garantem, respectivamente, que cada veículo sairá de sua garagem de origem uma única vez e chegará a sua garagem de destino também uma única vez. A restrição (6) garante que cada cliente será atendido por um único veículo e uma única vez. A restrição (7) garante que um local de embarque estará sempre na mesma rota que seu respectivo local de desembarque. A garantia de equilíbrio de fluxo, ou seja, tudo que entra é igual a tudo que sai de um dado nó, é garantida pelas restrições (8) e (9). A restrição (10) determina o horário de início e o tempo de espera em cada local e o veículo que o atenderá.

A restrição (11) determina a carga dos veículos em cada local e as restrições (12), (13) e (14) garantem, respectivamente, um cálculo correto dos horários de chegada e partida dos locais e dos tempos de viagem dos clientes. A restrição (15) faz a inicialização de variáveis referentes à garagem e por último as restrições de (16) a (18) definem os tipos de variáveis.

3.2.3 Métodos de resolução exatos e heurísticos

A complexidade de um PRV é dependente de seu tamanho (número de nós/arcos a serem visitados) bem como da combinação de características que o define. Esses problemas pertencem à classe NP-difícil, onde o esforço computacional para sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (CUNHA, 2000; FRAGA NETO, 2015). Por isso, os algoritmos computacionais para resolução desses problemas se desenvolveram em dois grupos principais: os que buscam uma solução ótima (exatos) e aqueles que buscam uma solução aproximada da melhor solução (heurísticos e meta-heurísticos) (FRAGA NETO, 2015).

Psarafits (1980) desenvolveu um algoritmo de Programação Dinâmica para casos com apenas um veículo e sem janelas de tempo; na sequência, em Psarafits (1983) o mesmo autor adaptou seu trabalho para o caso com janelas de tempo. Em ambos os trabalhos foram resolvidas instâncias com no máximo 10 requisições do DARP. Logo depois Desrosiers, Dumas e Soumis (1986) descreveram o algoritmo de Programação Dinâmica para o mesmo caso de um veículo e janelas de tempo incluindo uma forma de eliminar estados que violam as restrições e conseguiram assim resolver problemas com até 40 requisições.

Dumas, Desrosier e Soumis (1991) resolveram instâncias com até 55 requisições usando o método de Geração de Colunas. Em Cordeau (2006) foi apresentado um modelo de Programação Linear Inteira Mista e resolvidas, de forma ótima, instâncias aleatórias com até 32 clientes, múltiplos veículos, frota homogênea e garagem única usando o algoritmo *Branch-and-Cut*. Haidemann (2007) propôs uma adaptação do algoritmo de Psarafits (1983) para um

caso particular onde vários clientes possuem o mesmo destino e resolveu um caso real de transporte escolar com até 35 clientes.

Rodrigues, Rosa e Resendo (2012) propuseram um modelo de Programação Linear Inteira Mista que tem como objetivo atender todos os clientes (se necessário aumentando o número de veículos) minimizando o tempo de percurso. O conforto dos usuários foi considerado nas restrições e na definição de janelas de tempo estreitas com 30 e 40 minutos e foi considerada uma frota homogênea. O modelo foi testado para até 20 clientes de um serviço real e foi capaz de obter solução ótima, além de levar à conclusão de que o aumento do número de veículos ou ofertar veículos com capacidades maiores não é garantia de tempos menores, pois as janelas de tempo restringem fortemente o problema.

Como pode-se perceber, a abordagem exata só é possível em casos pequenos do DARP o que não ocorre em grande parte dos problemas reais. Sendo assim, surge como alternativa os métodos aproximativos ou heurísticos. Bodin et al. (1983) definem um algoritmo heurístico como um procedimento que usa a estrutura do problema de forma matemática para gerar solução viáveis próximas do ótimo.

Segundo Haidemann (2007), os métodos heurísticos podem ser enquadrados em três categorias:

- a) Procedimentos para construção de rotas: geram rotas factíveis quase ótimas, não necessitando a intervenção de outro procedimento;
- b) Procedimentos para melhoria de rotas: têm como ponto de partida rotas quase ótimas obtidas dos processos construtores, a partir daí se executam algoritmos que buscam melhorar a solução inicial e também as que advém do processo de melhoria;
- c) Procedimentos compostos: utilizam um algoritmo para construção de uma rota inicial, de modo que possa ser obtida tão rápido quanto possível; em seguida são aplicadas as técnicas para melhoria partindo da solução obtida pelo procedimento construtor, retornando uma solução final refinada.

De forma similar, Kaiser (2009) classifica os métodos heurísticos em construtivos e melhorativos; o primeiro com finalidade de gerar uma solução inicial ou um grupo (*cluster*) de soluções iniciais e o segundo com a finalidade de determinar uma melhoria das soluções encontradas. O autor também relata que a limitação dos métodos heurísticos é a dificuldade de não estagnação em ótimos locais, e que assim surgiram as meta-heurísticas que agregam mecanismos de fuga desses pontos. O uso desse tipo de procedimento se justifica também pela agilidade em obter soluções, isso porque o esforço computacional para chegar no resultado

exato, mesmo que seja possível obtê-lo, é muito alto.

O procedimento mais comum para resolução do DARP encontrado no referencial teórico é do tipo composto. Primeiramente é utilizada uma heurística de construção e uma de programação para obter uma solução inicial factível. Posteriormente, aplicam-se procedimentos de melhoria heurísticos ou meta-heurísticos. A seguir são descritos os principais métodos heurísticos encontrados durante o levantamento bibliográfico realizado para este trabalho.

Uma heurística de inserção sequencial foi proposta por Jaw et al. (1986) para o DARP com múltiplos veículos e janela de tempo. Nesta heurística as requisições são ordenadas segundo um critério de horário e são inseridas nas rotas, de acordo com a ordenação, de forma a resultar o menor acréscimo de custo. O método foi testado para uma instância artificial com até 250 requisições e para uma base de dados real de uma cidade alemã com aproximadamente 2600 clientes (a partir da base foram geradas situações simuladas).

Madsen, Ravn e Rygaard (1995) desenvolveram uma heurística de inserção que usa um critério de dificuldade na ordenação das requisições. Dessa forma solicitações com janela de tempo mais restrita são inseridas no início quando há mais espaço ocioso nas rotas e isso reduziu de 6 a 10 vezes o tempo de execução da heurística para problemas com 24 veículos e 300 clientes provenientes de um caso real em Copenhagen.

Toth e Vigo (1996) usaram uma heurística de inserção paralela complementada pela aplicação de um método de melhoria do tipo Busca Local. No método desenvolvido são definidos dois tipos de troca de posições. A primeira, chamada intrarota, consiste na tentativa de melhoria que se dá pela alteração na sequência em que as requisições de transporte serão atendidas. Já a segunda, chamada de troca inter-rotas, considera a possibilidade de trocar requisições de transporte entre rotas distintas. Os resultados foram obtidos com instâncias envolvendo de 276 a 312 requisições provenientes de um caso real em Bologna, na Itália. Em Toth e Vigo (1997) os autores aprimoraram seu próprio método usando Busca Tabu e melhorando os resultados obtidos pela versão original.

Baugh, Kakivata e Stone (1998) utilizaram a meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) na resolução do DARP. Foi usada uma abordagem do tipo “agrupar primeiro” e “rotear depois”, onde os clientes são inicialmente divididos em grupos, e depois para cada grupo é determinada a ordem de atendimento de seus clientes. O agrupamento é feito pela SA e a roteirização através da heurística do vizinho mais próximo, sendo que o método foi testado para até 300 clientes.

Znamenski e Cunha (1999) propuseram um método que usa uma adaptação da heurística de inserção apresentada por Madsen, Ravn e Rygaard (1995) seguida por um

procedimento de melhoria do tipo Busca Local. Eles aplicaram um método em uma situação real extraída do sistema Atende de São Paulo com 349 requisições.

Cordeau e Laporte (2003) utilizaram Busca Tabu para resolver o DARP na forma estática, com múltiplos veículos, frota homogênea e garagem única. Os resultados foram obtidos com o uso de instâncias com 24 a 144 clientes, geradas aleatoriamente, mas baseadas em informações cedidas pela *Montreal Transit Commission* (MTC). O método também foi testado em instâncias reais com 200 e 295 clientes cedidas por uma transportadora dinamarquesa.

Em Attanasio et al. (2004) foi proposta a aplicação de computação paralela para melhorar o tempo computacional do método desenvolvido por Cordeau e Laporte (2003) possibilitando trabalhar com situação dinâmicas do DARP. Os testes foram feitos nas mesmas instâncias do trabalho original e os experimentos comprovaram a eficiência da abordagem na resolução de problemas em tempo real.

Mauri e Lorena (2009) apresentaram um modelo relaxado com função multiobjetivo para o caso estático do DARP. O relaxamento transfere algumas das restrições para a função objetivo deixando a solução computacional mais fácil de ser encontrada, no entanto acaba permitindo algumas soluções inválidas. O modelo proposto permite múltiplos veículo, frota heterogênea e garagens múltiplas, mas pode ser facilmente adaptado a situações mais simples do que essa. A função multiobjetivo permite combinar a minimização do custo com a melhoria do nível de serviço e é flexível quanto à importância dos requisitos. A primeira tentativa de resolução foi utilizando a ferramenta CPLEX, no entanto nenhuma solução exata foi encontrada em menos de 60 minutos para instâncias que combinam 24 a 144 requisições de atendimento e 3 a 13 veículos. Assim, resolveram adotar uma combinação de heurísticas de programação e distribuição com a meta-heurística SA, na tentativa de obterem êxito na resolução do problema. Os resultados foram comparados ao de dois outros autores que trabalharam com o mesmo conjunto de instâncias artificiais, entre eles Cordeau e Laporte (2003), e os resultados computacionais indicaram um aumento na distância total percorrida, mas os indicadores de inconveniência ao usuário foram reduzidos.

Faria et al. (2010) resolveu um exemplo real da cidade de São José dos Campos, em São Paulo, com 260 requisições e múltiplos veículos usando também a heurística de Inserção Paralela. Os autores destacaram como vantagem no uso real do método a redução do tempo necessário para elaborar as rotas quando comparada à construção manual.

Kaiser (2009) propôs o uso de um método chamado *Cluster Search*, uma meta-heurística híbrida que combina uma meta-heurística com outras técnicas de otimização. A meta-

heurística utilizada foi a SA e os testes foram feitos nas instâncias artificiais usadas por Cordeau e Laporte (2003) e Mauri e Lorena (2009). Foi possível reduzir o tempo de processamento em relação ao trabalho de Mauri e Lorena (2009), devido à característica do *Cluster Search* em procurar as soluções vizinhas apenas nos *Clusters* mais promissores.

Parragh et al. (2012) propõem uma formulação para uma versão heterogênea do DARP com restrições relacionadas aos motoristas. Eles usam para a resolução uma estratégia que combina a resolução exata com o algoritmo de Geração de Colunas e uma heurística baseada em *Variable Neighborhood Search* e também os dois métodos de forma separada. Para testar o método eles adaptaram as instâncias artificiais de Cordeau e Laporte (2003) e obtiveram bons resultados em um curto período de tempo com os dois métodos. O sistema combinado melhora o desempenho do método exato em alguns casos. Foram também feitos testes em 15 instâncias reais da *Austrian Red Cross*.

Em Parragh e Schmid (2013) é proposto um método híbrido baseado em Geração de Colunas e *Large Neighborhood Search* e obtiveram novos melhores resultados para 9 das 20 instâncias artificiais de Cordeau e Laporte (2003).

Uma versão do DARP heterogêneo com múltiplos depósitos é discutida por Braekers, Caris e Janssens (2014). Os autores usam o algoritmo *Branch-and-cut* para resolver instâncias pequenas e validar o modelo e, para as maiores, é proposta uma meta-heurística *deterministic annealing*. Os resultados da meta-heurística foram comparados à solução exata e obtiveram solução quase ótimas, além de ter se mostrado eficiente computacionalmente, diferente do método exato cujo tempo de processamento aumenta drasticamente com o número de requisições.

E, por último, Oliveira e Amaral (2015) testaram o uso da meta-heurística ILS, que será utilizada neste trabalho. Os testes foram feitos nas instâncias artificiais usadas em outros trabalhos supracitados e foi possível melhorar os valores da função objetivo quando comparado ao trabalho de Cordeau e Laporte (2003) e Mauri e Lorena (2009).

Tendo em vista o que foi apresentado neste capítulo, os métodos de solução encontrados na bibliografia pesquisada e as características do estudo de caso no qual este trabalho é baseado decidiu-se pelo uso de uma abordagem heurística para resolução do problema. A formulação matemática apresentada na subseção anterior contribuiu para o entendimento das variáveis usadas para representação do problema e sua função objetivo se adequa fortemente ao objetivo do estudo de caso aqui proposto, caracterizado no próximo capítulo.

4. ESTUDO DE CASO

Nesse capítulo serão apresentados a caracterização do estudo de caso no Transporte Eficiente que transporta pessoas com deficiência no transporte público de Joinville-SC e um aprofundamento na descrição da abordagem heurística a ser utilizada.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

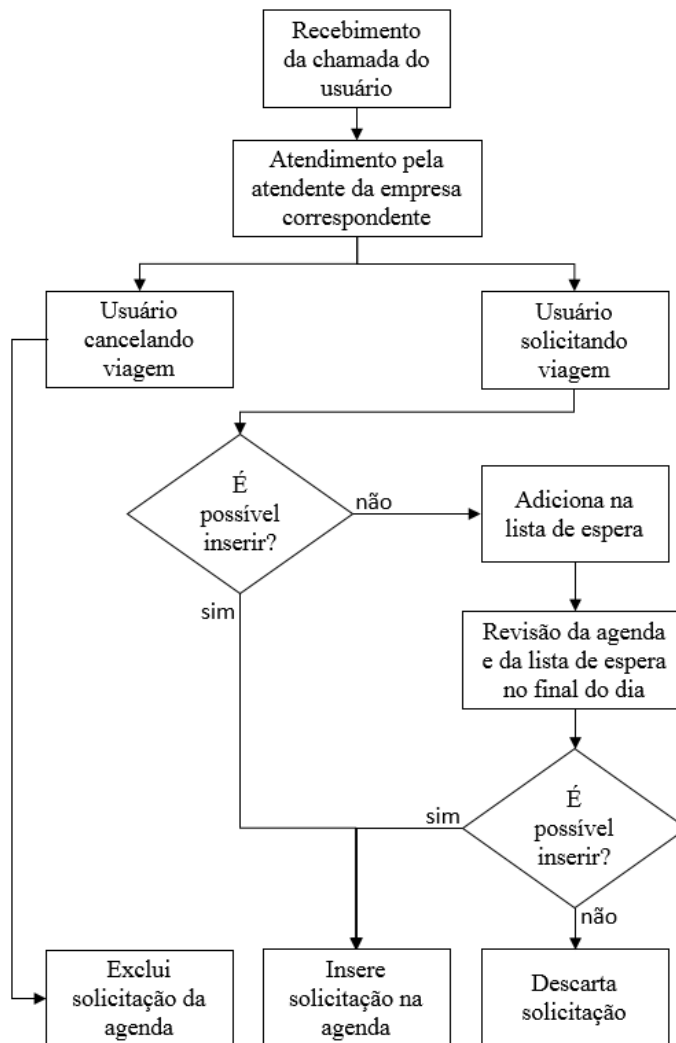
4.1.1 Histórico e funcionamento do serviço

O Transporte Eficiente é operado em Joinville pelas empresas concessionárias do transporte público, Gidion e Transtusa, que atuam no transporte público coletivo da cidade desde os anos 1960 e hoje cada uma possui uma área prioritária de atuação (norte e sul). A área comercial e administrativa das duas empresas é executada pela Passebus, uma empresa privada de propriedade de ambas que foi fundada em 2001 quando se deu o início da bilhetagem eletrônica em Joinville (GIDION, 2017).

O Transporte Eficiente passou a operar em Joinville em caráter experimental no ano de 2000 e foi posteriormente oficializado como parte do sistema de transporte público coletivo da cidade. Hoje o serviço das duas empresas é coordenado de forma integrada a partir da Passebus, no entanto, a operação em si ainda é separada, com cada empresa atendendo sua região com veículos distintos. Um dos objetivos da integração era passar a operar esse serviço com a frota unificada, mas esse processo foi deixado de lado devido às barreiras institucionais encontradas.

Para usar o serviço o cidadão deve se cadastrar na Passebus, apresentando a comprovação através da deficiência temporária ou permanente. Não existe restrição no serviço quanto ao tipo de deficiência, ela gerando dificuldade de locomoção ou não. Para realizar o agendamento, o usuário deve telefonar para um número próprio do serviço e informar sua requisição de transporte. O processo interno de recebimento e processamento das solicitações pela central telefônica é melhor explicado pelo fluxograma na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma de recebimento das solicitações do Transporte Eficiente



Fonte: Elaborado pelo autor

Cada empresa possui uma atendente e elas só realizam o atendimento de outra empresa caso haja uma sobrecarga de chamadas. A atendente faz a verificação da possibilidade de encaixar o usuário na agenda de forma manual, com base no seu conhecimento das rotas e analisando o estado atual da agenda em uma planilha eletrônica. Se possível, a requisição é inserida e informa-se ao usuário o horário aproximado em que o veículo o buscará. Existe, também, uma lista de espera que é analisada ao final do dia para tentar novamente a inclusão das requisições pendentes à agenda ou descartá-las. O usuário também pode ligar para fazer cancelamentos.

Esse procedimento é válido para os agendamentos eventuais (apenas para um dia) ou cancelamentos. Caso o usuário queira fazer uma requisição para usar o serviço de forma periódica (no cronograma fixo) essa requisição será avaliada por mais tempo e o usuário recebe

um retorno posteriormente. Nesse caso, a empresa pode vir a fazer ajustes nos horários de outros usuários para tentar encaixar a nova requisição.

Cada empresa possui seis veículos para o Transporte Eficiente com diferentes configurações de capacidade de cadeiras e assentos normais, conforme descrito na Tabela 2, e cada uma possui também um veículo reserva. Os motoristas são dois para cada carro (excluindo o reserva) com turnos de 8 horas (manhã e tarde) com no mínimo 1 hora de parada para refeição. A garagem é a mesma para todos os carros da Transtusa e, para os da Gidion são usadas duas, mas cada carro sempre sai e retorna para a mesma. A Figura 7 traz a imagem de um veículo do serviço.

Tabela 2 – Capacidades dos veículos do Transporte Eficiente

Empresa	Número do Veículo	Lugares p/ cadeira de rodas	Assentos
Transtusa	1602	6	6
	1128	6	4
	701	4	7
	1127	6	4
	1502	7	6
	1601	6	6
Gidion	11152	6	4
	11053	6	4
	11151	6	4
	11552	6	6
	11651	6	6
	11054	6	4

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 7 – Veículo do Transporte Eficiente



Fonte: Transtusa (2017)

As janelas de tempo usadas pela empresa são do tipo unilateral. No caso da viagem de ida, o usuário informa um desejo de comparecimento no destino e o compromisso da empresa é entregá-lo antes desse horário. Nesse caso, a atendente informa um horário mínimo aproximado em que o veículo pode buscá-lo sem considerar nenhum limitante como tempo máximo de viagem, e o usuário deve decidir se aceita aquele horário ou não. Para as viagens de volta, o usuário informa o horário em que deseja ser coletado na origem e o veículo pode buscá-lo a qualquer momento posterior ao horário informado. O horário de chegada ao destino nesse caso não é definido, pois novamente não existe limite para o tempo total de viagem nem limite superior para a coleta.

Com essa configuração, acaba por não existir o conceito de tempo de espera do veículo no serviço, pois impondo apenas um limite inferior na janela de tempo não há nunca a necessidade de o veículo esperar no ponto até o momento de realizar o serviço (embarque e desembarque) para cumprir a janela de tempo.

4.1.2 Construção das variáveis do modelo

Considerando o modelo descrito no fim do capítulo anterior e as características do serviço apresentadas acima, foram definidas da seguinte maneira as variáveis relacionadas a cada requisição do Transporte Eficiente:

- A carga q_i de cada requisição foi obtida das agendas fornecidas e foi separada em dois tipos: q_{cr} para representar uma demanda por cadeira de rodas e q_a para representar uma demanda por assentos. As adequações necessárias foram feitas na função de avaliação e nos demais procedimentos adotados.
- O tempo de serviço (embarque ou desembarque do passageiro) s_i foi considerado como constante para todos os pontos e atribuído o valor de 5 minutos;
- As janelas de tempo foram construídas, de forma similar a Cordeau (2006), usando o tempo máximo de viagem do usuário (R'') e uma largura de janela de tempo (L) igual a 30 minutos. Dessa forma, sendo H o instante solicitado pelo usuário para chegar no destino, tem-se os seguintes limites inferior e superior da janela para o sentido de ida:
 - Na origem: $e = l - L$ e $l = H - R''$;
 - No destino: $e = H - L$ e $l = H$.
- E da mesma forma para o sentido de volta:

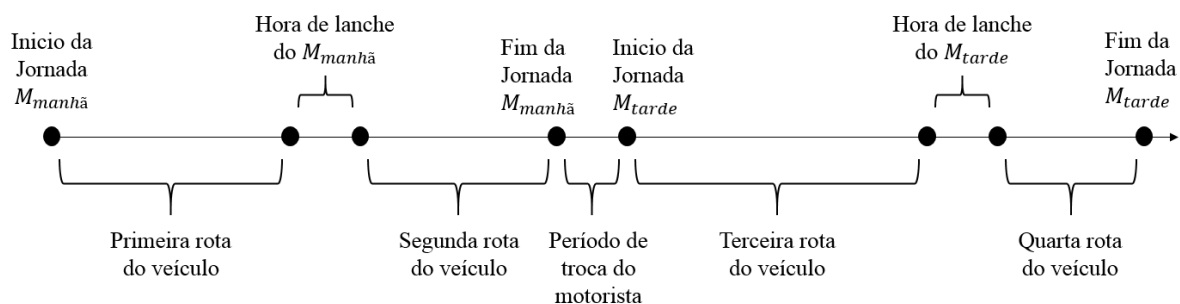
- Na origem: $e = H$ e $l = H + L$;
- No destino: $e = H$ e $l = H + R'' + L$.

Observa-se que as janelas de tempo foram consideradas na forma bilateral, isso porque um dos objetivos desse trabalho é fornecer mais conforto ao passageiro, por isso a nova rota proposta será feita com as considerações necessárias para isso. Da mesma forma, para cada veículo:

- As capacidades foram separadas em duas parcelas, Q_{cr} , para as cadeiras de rodas e, Q_a , para assentos, com valores conforme a Tabela 2 na subseção anterior;
- Uma garagem de destino e uma de origem foram atribuídas a cada veículo, ambas localizadas no mesmo endereço.
- Cada veículo possui 2 motoristas com um horário de início de jornada e um horário de início do intervalo de sua jornada. Esses horários são diferentes um dos outros e por isso são associados ao veículo, tendo como função definir os períodos em que o carro está disponível para o roteiro.

Devido a esse particionamento da disponibilidade do veículo durante o dia, foram criadas rotas para cada período de trabalho dos motoristas, ou seja, cada veículo terá, por dia, 4 rotas construídas com início e fim na garagem correspondente do veículo. Essa divisão, detalhada na Figura 8, tem por objetivo facilitar a implementação das restrições que envolvem os motoristas.

Figura 8 – Esquema da divisão da rota diárias de cada veículo



$M_{manhã}$ é o motorista da parte da manhã

M_{tarde} é o motorista da parte da tarde

Fonte: Elaborado pelo autor

Além disso cada rota deve respeitar:

- T'' : tempo máximo de duração da rota, que corresponde ao período de disponibilidade do veículo. Exemplo: se o motorista da manhã inicia seu turno às

5:00h e faz o intervalo às 9:00h, o tempo máximo de duração da primeira rota será de 4:00h. Na prática esses valores são bem variados, o início da jornada da manhã, por exemplo, pode iniciar entre às 04:10h até às 6:00h. Ao final do dia o limite para o veículo como um todo será de 14 horas de duração (8 horas de cada motorista, descontando as horas de pausa).

- R'' : tempo máximo de viagem do usuário, que conforme explicado anteriormente, não é sempre considerado pelas empresas, mas eles buscam seguir um limite de 2 horas e então esse valor será utilizado no trabalho.
- W'' : tempo máximo de espera que não é usado pelas empresas devido às janelas de tempo unilaterais, mas nesse trabalho será considerado como 30 minutos, pois um valor limitado evitará que essa espera aconteça com frequência.

As distâncias entre nós foram calculadas usando a distância euclidiana entre os pontos, ajustada com um fator de 1,35 e depois convertida em quilômetros. Esse fator de ajuste para áreas urbanas é proposto por Novaes (1989) e foi obtido através de regressão linear. Os pontos possuem coordenadas iguais às suas respectivas latitudes e longitudes, que foram identificadas através do *Google Maps* usando o endereço. Para o cálculo do tempo de percurso entre um ponto e outro foram usados valores de velocidades constantes conforme a faixa de distância apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Faixas de velocidades adotadas conforme distância

Faixa de distância (km)	Velocidade adotada (km/h)
distância \leq 10	15
10 < distância \leq 20	30
distância > 20	60

Fonte: Adaptada de Znamenski e Cunha (1999)

Por último, destaca-se que as agendas fornecidas pelas empresas incluem as requisições eventuais daqueles dias, e não apenas o cronograma fixo. Como esse trabalho se propõe a realizar um estudo considerando a parte estática do serviço, será considerado que todas as requisições fazem parte do cronograma fixo.

4.2 DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE SOLUÇÃO

4.2.1 Solução inicial

Para a solução inicial foi utilizado o procedimento descrito em Oliveira e Amaral (2015) que consiste em ordenar cronologicamente as requisições pelo tempo médio da janela de tempo e, enquanto houver requisições, adicionar o primeiro ponto de embarque na rota cuja distância do último ponto seja a menor. Os pontos de desembarque são adicionados na sequência do embarque e no início e fim de cada rota são inseridas as garagens correspondentes.

4.2.2 Programação

Como esse é um problema de roteirização e programação de veículos, além da ordem da visita é também preciso definir os instantes em que o veículo chega e sai de cada ponto e o instante em que ele realiza o serviço. Para isso, foi utilizada uma heurística de programação proposta por Cordeau e Laporte (2003) e adaptada por Mauri (2008) para o modelo descrito no capítulo anterior. A heurística é descrita na Figura 9, e cabe apenas ressaltar que neste trabalho usa-se uma carga do tipo composta (cadeira de rodas e assento convencional), por isso para a atualização da carga Q_i de cada ponto deve ser feita a atualização de ambos os tipos de cargas.

Figura 9 – Heurística de programação.

1. $B_0 \leftarrow e_0$; $D_0 \leftarrow B_0$;
2. CALCULAR $(A_i, B_i, W_i, D_i, Q_i)$ para cada ponto $v_i \in V_k$ e $v_i \neq v_0$;
3. CALCULAR (F_0) ;
4. $B_0 \leftarrow e_0 + \min\{F_0, \sum_{0 < p \leq z} W_p\}$; $D_0 \leftarrow B_0$;
5. ATUALIZAR (A_i, B_i, W_i, D_i) , para cada ponto $v_i \in V_k$ e $v_i \neq v_0$;
6. CALCULAR (R_i) para cada ponto $v_i \in V_k$ e $v_i \in P$;
7. PARA (cada ponto $v_i \in V_k$ e $v_i \in P$) FAÇA
8. CALCULAR (F_i) ;
9. $B_i \leftarrow B_i + \min\{F_i, \sum_{i < p \leq z} W_p\}$;
10. $D_i \leftarrow B_i + s_i$; $W_i \leftarrow B_i - A_i$;
11. ATUALIZAR (A_j, B_j, W_j, D_j) , para cada ponto $v_j \in V_k$ e posterior a v_i ;
12. ATUALIZAR (R_j) para cada ponto $v_j \in V_k$ e $v_j \in P$ e v_{n+j} posterior a v_i ;
13. FIM PARA;

Essa heurística emprega o conceito de atraso (F), proposto por Savelsberg (1992), que tem por objetivo atrasar a saída da garagem e o atendimento nos pontos para reduzir os tempos de espera do veículo, sem que haja violação das janelas de tempo ou do tempo máximo de viagem dos usuários. O atraso é calculado de acordo com as Equações (19) a (21). Na Equação (19), definida para todos os pontos de embarque, o atraso representa o tempo máximo em que o veículo poderá aguardar antes de iniciar o serviço sem gerar nenhuma violação de janela de tempo nos pontos seguintes. Na definição de atraso para a garagem de partida, Equação (20), é apenas desconsiderada as violações nos tempos de viagem dos clientes, e para os pontos de desembarque e a garagem final, não existe cálculo de atraso.

$$F_i = \min_{i \leq j \leq z} \left\{ \sum_{i < p \leq j} W_p + (\min\{l_j - B_j, R''_i - R_j\})^+ \right\} \quad \text{se } i \in P \quad (19)$$

$$F_i = \min_{i \leq j \leq z} \left\{ \sum_{i < p \leq j} W_p + (l_j - B_j) \right\} \quad \text{se } i \in G^- \quad (20)$$

$$F_i = 0 \quad \text{se } i \in \{U \cup G^+\} \quad (21)$$

4.2.3 Busca local e a meta-heurística ILS

O procedimento de busca local, também conhecido como método de descida, tem como objetivo encontrar ótimos locais gerando soluções vizinhas e aceitando somente as que cumpram algum critério (OLIVEIRA; AMARAL, 2015). As soluções vizinhas de uma solução são aquelas que podem ser alcançadas a partir de movimentos limitados. Os movimentos usados neste trabalho são o de reordenação, realocação e troca, esquematizados nas Figuras 10 a 12.

Figura 10 – Movimento reordenar rota

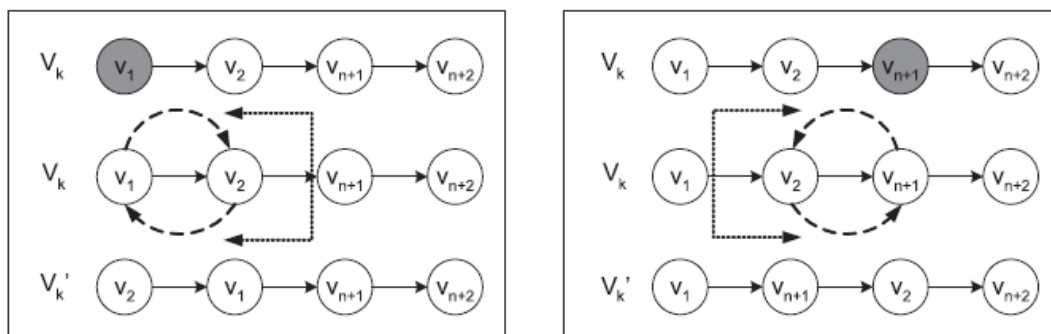
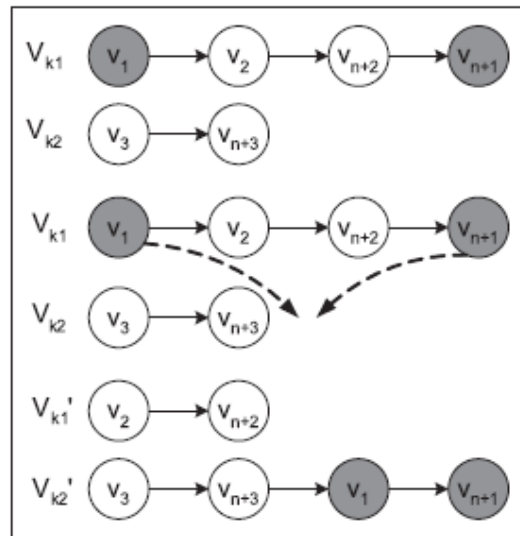
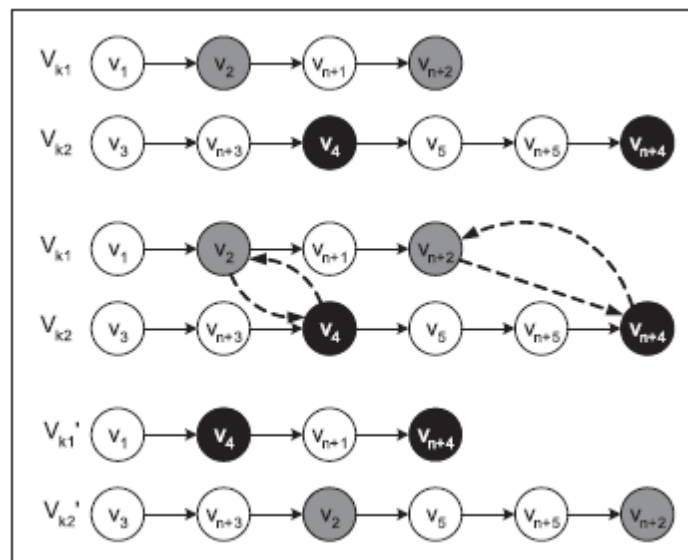


Figura 11 – Movimento realocar



Fonte: Mauri e Lorena (2009)

Figura 12 – Movimento troca



Fonte: Mauri e Lorena (2009)

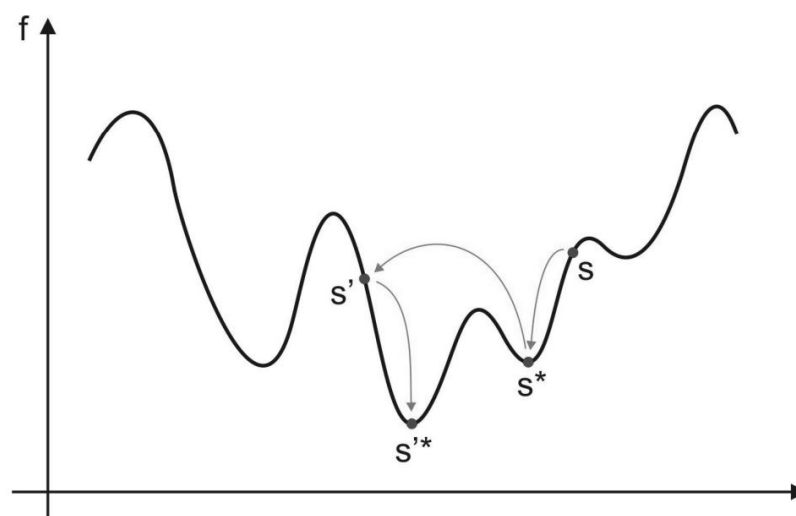
O movimento de reordenação (Figura 10) consiste em retirar um nó de uma rota e colocá-lo de volta em outra posição que não viole a relação de precedência entre coleta e entrega. O movimento de realocação (Figura 11) faz a mudança de um nó de uma rota para outra, levando junto seu nó de embarque ou desembarque. O movimento de troca (Figura 12) seleciona um par de nós de uma rota e outro par de vértices de uma segunda rota e os troca de posição.

Neste trabalho, a cada iteração da busca local, um movimento e uma ou duas rotas são

escolhidas aleatoriamente para gerar uma solução vizinha. A partir destas é escolhido também um ou dois nós aleatórios e todas as possibilidades são mapeadas mantendo-se a melhor de todas. Essa forma de busca local gera uma análise mais abrangente da vizinhança do que um procedimento completamente aleatório. O algoritmo de busca local é interrompido depois de um certo número de iterações sem melhora, que nesse trabalho será de 100 iterações (valor calibrado durante os testes). A busca local leva a solução para um ótimo local e o objetivo de utilizar uma meta-heurística é sair deste ótimo e permanecer na busca do ótimo global ou de um ótimo local melhor.

Com esse objetivo, a meta-heurística *Iterated Local Search* gera, a partir de uma solução inicial S , um ótimo local S^* e, a cada iteração, executa uma perturbação, obtendo uma solução perturbada S' , seguida de uma nova busca local para gerar uma nova solução local S'^* que é aceita caso seja melhor. Esse procedimento é ilustrado na Figura 13. A perturbação é uma função que realiza um movimento que não gere vizinhas tão próximas a ponto de cair no mesmo ótimo local, nem tão longe que gere um reinício aleatório da solução e deve-se levar em conta na sua definição as características do problema (OLIVEIRA; AMARAL, 2015; GOMES, 2009). Para a função de perturbação, o movimento empregado considerou a escolha de um nó aleatório e a permuta deste com o nó seguinte, evitando sempre a violação da precedência. Esse movimento é descrito por Oliveira e Amaral (2015). A Figura 14 apresenta o algoritmo de funcionamento da ILS.

Figura 13 – Funcionamento da ILS



Fonte: Gomes (2009)

A função de avaliação do custo é a função objetivo, Equações (1) a (3), da formulação

matemática. Essa função tem seus termos penalizados por números inteiros que definem a importância de cada termo no objetivo como um todo. Para esse trabalho serão utilizados os mesmos valores considerados em Mauri e Lorena (2009) e Oliveira e Amaral (2015) que são 1.500 para todos os β (requisitos essenciais), 8 para o ω_0 (distância percorrida), 1 para ω_3 (tempo de viagem dos usuários) e ω_4 (tempo de espera do veículo) e 3 para ω_2 (duração da rota). O valor alto para a penalização dos requisitos essenciais serve para evitar solução infactíveis, pois esses termos são provenientes do relaxamento das restrições, além disso o termo que penaliza o número de veículos utilizados é zero, pois o número de veículo nesse caso é fixo. Como critério de parada do algoritmo é usado um número máximo de iterações sem melhora na função custo. Oliveira e Amaral (2015) utilizaram 15 iterações sem melhora e este mesmo limite será considerado neste trabalho.

Figura 14 – Algoritmo ILS

```

1. DADO ( $S$ ,  $maxIter$ ) FAÇA
2.  $S^* \leftarrow BuscaLocal(S)$ ;
3.  $custo^* \leftarrow funçãocusto(S^*)$ ;
4. ENQUANTO ( $numIter < maxIter$ ) FAÇA
5.    $S' \leftarrow S^*$ ;
6.    $perturbação(S')$ ;
7.    $S'^* \leftarrow BuscaLocal(S')$ ;
8.    $custo'^* \leftarrow função\ custo(S'^*)$ ;
9.    $numIter \leftarrow numIter + 1$ ;
10.  SE ( $custo'^* < custo^*$ ) ENTÃO
11.     $S^* \leftarrow S'^*$ ;
12.     $numIter \leftarrow 0$ ;
13.  FIM SE
14. FIM ENQUANTO
15. RETORNA ( $S^*$ );

```

Fonte: Adaptado de Oliveira e Amaral (2015)

A implementação do método foi feita na linguagem C#, usando o Visual Studio 2015. Para a avaliação dos resultados utilizou-se também o Excel. A execução do programa foi feita em um computador com processador Intel Core I5 – 5500, com 6GB de memória RAM e Sistema Operacional Windows 8. No próximo capítulo, serão apresentados os resultados da aplicação da meta-heurística.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesse capítulo serão apresentados os resultados da execução do método de solução descrito no capítulo anterior. Primeiramente, as análises foram realizadas considerando as empresas de forma separada (executando o método para cada uma) e, posteriormente, é feita uma análise complementar considerando a união da operação das duas empresas. Espera-se ao final desse capítulo poder concluir se esse trabalho atingiu seu objetivo principal.

5.1 ANÁLISE DA OPERAÇÃO INDIVIDUAL DAS EMPRESAS

5.1.1 Função objetivo

Os dados utilizados compreendem uma semana de dias úteis (segunda à sexta) e, para cada um desses dias existe um conjunto com n requisições de cada empresa (o número de nós do problema é $2n$). Cada uma das 10 combinações de dia e empresa serão referidas como instâncias do estudo de caso. Além disso, embora para a execução tenha sido considerado que cada veículo realiza 4 rotas por dia conforme explicado no capítulo anterior, nas análises realizadas neste capítulo a rota de um veículo corresponde ao total do dia (consolidando as 4 partes).

Para avaliar a dispersão dos resultados da função objetivo, foram feitas 3 execuções da meta-heurística para cada uma destas instâncias. Os resultados da função objetivo são apresentados na Tabela 4, onde pode-se observar o melhor valor entre as 3 execuções, a média de todas as execuções e ao final, o desvio do melhor resultado em relação à média calculado pela Equação (22).

$$Desvio = \left(\frac{f(S) \text{ média} - \text{melhor } f(S)}{\text{melhor } f(S)} \right) * 100 \quad (22)$$

Os desvios representam a variabilidade do método de uma execução para a outra, e quanto menor forem, melhor. Apenas 3 das instâncias apresentaram desvios baixos (menores

que 3%), indicando que a execução da meta-heurística foi muito afetada pelos fatores aleatórios envolvidos, chegando a diferentes ótimos locais para cada execução.

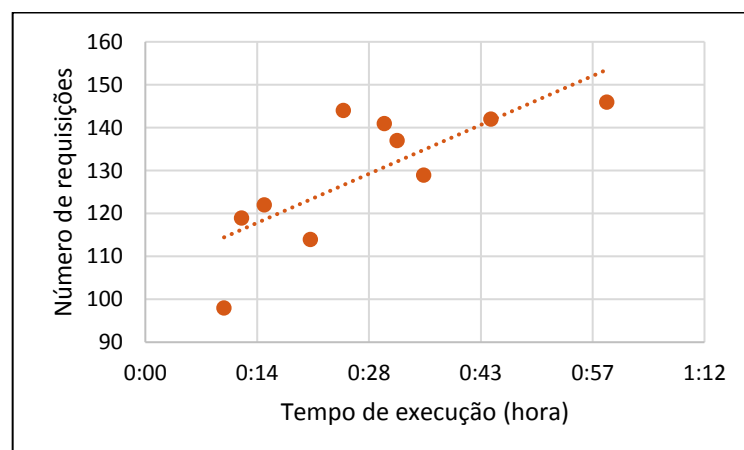
Tabela 4 – Resultados da função objetivo

Dia	Empresa	n	Função objetivo		Desvio (%)
			Melhor	Média	
1	Transtusa	122	$6.675,51 \times 10^3$	$7.220,83 \times 10^3$	8,17
	Gidion	141	$11.209,30 \times 10^3$	$12.042,34 \times 10^3$	7,43
2	Transtusa	142	$8.699,44 \times 10^3$	$8.885,69 \times 10^3$	2,14
	Gidion	144	$9.159,95 \times 10^3$	$9.348,45 \times 10^3$	2,06
3	Transtusa	119	$2.764,99 \times 10^3$	$2.928,55 \times 10^3$	5,92
	Gidion	137	$8.196,42 \times 10^3$	$8.783,71 \times 10^3$	7,17
4	Transtusa	129	$8.878,31 \times 10^3$	$9.557,49 \times 10^3$	7,65
	Gidion	146	$10.189,25 \times 10^3$	$10.286,50 \times 10^3$	0,95
5	Transtusa	98	$4.162,73 \times 10^3$	$4.490,98 \times 10^3$	7,89
	Gidion	114	$5.470,43 \times 10^3$	$6.037,92 \times 10^3$	10,37
Média	-	129	$7.540,63 \times 10^3$	$8.958,25 \times 10^3$	5,97

Fonte: Elaborado pelo autor

Os tempos de execução da meta-heurística, apesar de apresentarem uma tendência de aumento conforme aumenta o número de requisições, foram bastante dispersos. A Figura 15 mostra a relação entre o número de requisições e o tempo de execução (em horas). Além disso, os tempos de execução foram muito elevados para uma meta-heurística, cuja uma das principais vantagens é a rapidez. Esse fato é devido à uma implementação pouco robusta dos métodos de geração e avaliação da vizinhança. Mesmo com os tempos elevados a aplicação da meta-heurística ILS melhorou em média 18,69% o valor da função objetivo em relação ao primeiro ótimo local.

Figura 15 – Relação entre o número de requisições e o tempo de execução do método



Fonte: Elaborado pelo autor

5.1.2 Custo operacional e conforto do usuário

Os valores da função objetivo acabam sendo pouco significativos em termos práticos, não representando nada além de um valor de avaliação e comparação de soluções. Para analisar melhor as rotas obtidas, serão agora detalhados os resultados das variáveis relacionadas ao custo operacional e a inconveniência ao usuário, considerando sempre a melhor solução encontrada entre as execuções. A Tabela 5 mostra o total e a média da distância percorrida pelos 6 veículos de cada instância, e duração total e média de cada rota.

Tabela 5 – Distância total percorrida e duração da rota na operação individual

Dia	Empresa	n	Distância percorrida (km)		Duração das rotas (horas)	
			Total	Média	Total	Média
1	Transtusa	122	1.439,71	239,95	97:37:00	16:16:00
	Gidion	141	1.413,44	235,57	99:56:00	16:39:00
2	Transtusa	142	1.569,29	261,55	110:23:00	18:23:00
	Gidion	144	1.623,96	270,66	108:38:00	18:06:00
3	Transtusa	119	1.233,83	205,64	87:32:00	14:35:00
	Gidion	137	1.418,14	236,36	108:16:00	18:02:00
4	Transtusa	129	1.817,67	302,95	112:42:00	18:47:00
	Gidion	146	1.530,09	255,02	114:07:00	19:01:00
5	Transtusa	98	1.221,57	203,60	83:01:00	13:50:00
	Gidion	114	1.281,26	213,54	91:54:00	15:19:00
Total	-	-	14.548,96	-	-	-
Média	-	129	1.454,90	242,48	101:24:00	16:54:00

Fonte: Elaborado pelo autor

A distância percorrida pelos veículos nas rotas propostas pela meta-heurística é em média 242,48km. Na coleta preliminar de dados, foi informado que os veículos do Transporte Eficiente se deslocam aproximadamente 170km por dia. Sendo, por essa aproximação, as rotas propostas pelas meta-heurísticas, em média, 29,89% mais longa que a realidade. Não foi possível obter, através das agendas, a distância percorrida por cada veículo em cada dia considerado nesse estudo, pois não é informada nas agendas a ordem da visita dos pontos (rotas) pelos veículos, e sim apenas quais as requisições são atendidas. No entanto, a empresa forneceu um levantamento da quilometragem total percorrida por todos os veículos em todos os 5 dias de estudo.

Para os carros da Transtusa o total foi de 7.427km e para os da Gidion um total de 6.447km, totalizando de forma consolidada 14.174km. Na Tabela 5, é possível encontrar o levantamento total da distância percorrida pelos veículos nas rotas propostas, e o valor é apenas

2,57% maior que o informado pela Passebus, no entanto os métodos de cálculo dessa distâncias são diferentes enquanto um é real o outro foi obtido através das distâncias euclidianas. A Tabela 6 abaixo resume melhor essa comparação.

Tabela 6 – Comparação entre as distâncias reais e as propostas pelo método

Empresa	Distância percorrida real (km)	Distância percorrida na rota proposta (km)
Transtusa	7.427,00	7.282,07
Gidion	6.447,00	7.266,89
Total	14.174,00	14.548,96

Fonte: Elaborado pelo autor

A duração total da rota, também apresentada na Tabela 5, considera o tempo em que o veículo ficou em serviço, desconsiderando as pausas da jornada. Embora desconheça-se situações onde houve horas extras ou que o motorista terminou a jornada mais cedo, o tempo de duração das rotas hoje deve ser de 14 horas (8 horas de cada motorista menos os horários de pausa). A média ficou em 16 horas e 54 minutos, ultrapassando para algumas instâncias as 19 horas de duração. Essa extrapolação acontece porque o tempo máximo de duração de algumas rotas não foi respeitado, indicando a não factibilidade da solução.

Além do custo operacional, a função custo também leva em conta algumas medidas de qualidade e conforto ao usuário. A Tabela 7 traz a análise do tempo de viagem do usuário e do tempo de espera do veículo para cada instância, considerando também o melhor resultado entre as execuções.

O limite estabelecido para o tempo de espera do veículo antes de realizar atendimento foi de 30 minutos, sendo assim, a média encontrada de 58 minutos excedeu em 48,28% o limite. O tempo de espera do veículo está relacionado ao conforto do usuário, pois para aquele que estiver dentro do veículo durante essa espera terá a sensação de desperdício de tempo, mas está também relacionado ao custo operacional e à capacidade de oferta do sistema. Por exemplo, para a primeira instância, das 97 horas e 37 minutos de rotas dos 6 veículos, 4 horas e 43 minutos (4,83%) foram gastas aguardando. O excesso no limite estabelecido indica mais uma vez que o método não foi capaz de gerar solução factível.

Já para o tempo médio de viagem, cujo limite estabelecido foi de 2 horas, a média ficou em 1 hora e 7 minutos, ou seja, 44,17% menor. Infelizmente, não existe uma estimativa desse valor para a realidade do serviço que possibilite uma comparação.

Tabela 7 – Tempo de espera e tempo de viagem na operação individual

Dia	Empresa	n	Tempo de espera do veículo (horas)		Tempo de viagem dos usuários (horas)	
			Total	Média	Total	Média
1	Transtusa	122	4:43:00	0:47:00	146:23:00	1:11:00
	Gidion	141	2:20:00	0:23:00	151:58:00	1:04:00
2	Transtusa	142	5:39:00	0:56:00	163:28:00	1:09:00
	Gidion	144	6:20:00	1:00:00	165:53:00	1:09:00
3	Transtusa	119	0:53:00	0:08:00	108:21:00	0:54:00
	Gidion	137	8:14:00	1:22:00	167:09:00	1:13:00
4	Transtusa	129	7:35:00	1:15:00	164:04:00	1:16:00
	Gidion	146	9:51:00	1:38:00	172:35:00	1:10:00
5	Transtusa	98	6:44:00	1:07:00	108:45:00	1:06:00
	Gidion	114	6:00:00	1:00:00	118:24:00	1:02:00
Média	-	129	5:48:00	00:58:00	146:42:00	1:07:00

Fonte: Elaborado pelo autor

Outras variáveis que podem indicar a obtenção de solução não factíveis são a violação da capacidade do veículo e a violação das janelas de tempo. Na Tabela 8 está apresentado o levantamento dessas violações nas melhores soluções.

Tabela 8 – Análise das violações das janelas de tempo e da capacidade do veículo

Dia	Empresa	2n	Violação das janelas de tempo		Violação da ocupação dos veículos		
			Ocorrências	Percentual (%)	Máxima de cadeira de rodas	Máxima de assentos	Ocorrências
1	Transtusa	244	65	26,64	5	3	0
	Gidion	282	52	18,44	4	3	0
2	Transtusa	284	58	20,42	5	4	0
	Gidion	288	75	26,04	6	4	0
3	Transtusa	238	18	7,56	5	4	0
	Gidion	274	59	21,53	5	4	0
4	Transtusa	258	56	21,71	5	3	0
	Gidion	292	75	25,68	4	3	0
5	Transtusa	196	48	24,49	4	4	0
	Gidion	228	55	24,12	4	3	0
Média	-	258	56	21,66	4,7	3,5	0

Fonte: Elaborado pelo autor

A capacidade do veículo não foi violada em nenhum ponto, já as janelas de tempo tiveram alto percentual de violação, o que já era esperado devido aos excessos na duração da rota. A média de violação desse requisito foi de 21,66% e apenas uma das instâncias ficou bem abaixo da média, com apenas 7,56% de pontos cuja janela de tempo não foi respeitada. Observa-

se nas tabelas anteriores que essa instância também apresentou baixos tempos de espera do veículo e teve o menor valor de função objetivo.

Os resultados do uso da meta-heurística ILS sofrem grande influência dos movimentos utilizados na busca local e na perturbação e devem levar em conta as características do problema (GOMES, 2009). Sendo assim, as soluções obtidas nesse trabalho podem não ter sido melhores devido às funções de busca local e perturbação usadas terem sido propostas e testadas para um caso com instâncias artificiais e menores.

Além disso, a comparação com a realidade é limitada pela ausência de dados e diferenças do modelo em relação a serviço real do Transporte Eficiente. O uso do conceito de tempo de espera do veículo e a forma de construção das janelas de tempo, dois fatores que geraram não factibilidade da solução, são diferenças do modelo para a realidade e os resultados obtidos levantam a hipótese de que, com essas considerações de conforto do usuário, talvez não seja possível atender todas as requisições e por isso houve extrapolação do limite de duração da rota. Na próxima seção é feita a análise de uma possível operação integrada das empresas.

5.2 ANÁLISE PARA A INTEGRAÇÃO DAS EMPRESAS

Conforme já mencionado as empresas tinham a intenção de passar a operar de forma unificada, mas essa unificação ainda não aconteceu devido às barreiras burocráticas e comerciais. Como análise complementar, serão feitas análises similares às da seção anterior, exceto pela análise da violação das janelas de tempo e da capacidade do veículo, considerando a soma dos veículos das duas empresas e a soma das requisições. Essa análise será feita apenas para os dois primeiros dias da amostra de estudo, devido ao custo computacional da implementação do método, que aumenta consideravelmente com o número de requisições.

5.2.1 Função objetivo

Os valores da função objetivo para as duas instâncias combinadas avaliadas são apresentados na Tabela 9. Para essa análise também foram executadas 3 vezes a meta-heurística para então considerar a melhor delas nas análises subsequentes. De forma geral, a junção das duas empresas não proporcionou melhoras na função objetivo pois, se comparar, por exemplo, a soma dos melhores resultados das duas instâncias do dia 1 na Tabela 4, tem-se um total de 17.884×10^3 comparado ao valor da combinação das duas empresas igual a 21.880×10^3 .

Tabela 9 – Resultados da função objetivo com a operação integrada das empresas

Dia	Empresa	n	Função objetivo			Média dos tempos de execução (horas)
			Melhor	Média	Desvio (%)	
1	Combinadas	263	$21.880,52 \times 10^3$	$22.659,97 \times 10^3$	3,56	01:42:31
2	Combinadas	286	$20.226,43 \times 10^3$	$21.694,38 \times 10^3$	7,26	01:40:47
Média	-	274	$21.053,48 \times 10^3$	$22.177,18 \times 10^3$	5,41	01:41:39

Fonte: Elaborado pelo autor

5.2.2 Custo operacional e conforto do usuário

Para o custo operacional e conforto do usuário, nesse caso foram levantados os valores da distância total percorrida e duração da rota na Tabela 10, e o tempo de espera do veículo e tempo de viagem do usuário na Tabela 11. Nesse caso, como foi feito o levantamento de dois dias apenas, não é possível comparar as distâncias com os dados fornecidos pela Passebus, mas pela média de 3.306,78km pode-se estimar que a distância total dos 5 dias seria algo em torno de 16.533,90km, bem mais elevado do que os 14.174km da operação real. A duração das rotas ficou 8,73% maior que a duração média na operação separada.

Tabela 10 – Distância total percorrida e duração das rotas na operação combinada

Dia	Empresa	n	Distância percorrida (km)		Duração das rotas (horas)	
			Total	Média	Total	Média
1	Combinadas	263	3.153,86	262,82	213:05:00	17:45:00
2	Combinadas	286	3.459,70	288,31	231:27:00	19:17:00
Total	-	-	6.613,56	-	-	-
Média	-	129	3.306,78	275,57	222:16:00	18:31:00

Fonte: Elaborado pelo autor

A média dos tempos de espera do veículo apresentaram um aumento de 6,45% em relação a operação individual e permanecem acima do limite de 30 minutos em 51,61%. Os tempos médio de viagem aumentaram 2,90%, e estão 42,50% abaixo do limite de 2 horas.

Através das análises feitas nesta seção não é possível concluir com precisão as vantagens ou desvantagens da integração das operações para a redução do custo operacional e da inconveniência ao usuário do Transporte Eficiente. Conforme já mencionado, a ineficiência do método em encontrar boas soluções tem relação com a função de perturbação que não foi eficaz em proporcionar a diversificação da meta-heurística. A função de perturbação, segundo

Gomes (2009) é mais eficiente quando leva em consideração as características reais do problema e, além disso, o nível de perturbação da solução (número de vezes em que os elementos da solução são alterados) precisa ser calibrado para cada situação.

Embora os resultados não tenham chegado a gerar soluções completamente factíveis, através das análises realizadas nesse capítulo acredita-se que a utilização de roteirização de veículos possa ser capaz de gerar benefício no serviço do Transporte Eficiente, mas de forma mais efetiva no aumento da qualidade e padronização do serviço do que na redução de custos. Isso porque, conforme já analisado, o modelo usado neste trabalho levou em conta características de conforto ao usuário que não fazem parte da operação do Transporte Eficiente e com a calibração correta deste modelo e do método seria possível obter soluções factíveis com mais conforto ao usuário do que a configuração atual do serviço. A seguir serão apresentadas as considerações finais do trabalho.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo estudar a aplicação de roteirização de veículo no transporte de pessoas com deficiência do município de Joinville-SC, que pode ser modelado como um Problema *Dial-a-ride*. Esse é um problema do tipo combinado, onde tanto as distâncias quanto as variáveis relacionadas ao tempo precisam ser otimizadas, e que pertence à classe NP-difícil dos problemas combinatórios. Sendo assim, optou-se por usar a meta-heurística *Iterated Local Search* na sua resolução.

Na modelagem do problema foi seguida uma formulação matemática que considera a otimização do custo da operação e do conforto sentido pelo usuário, que tem relação com os tempos de viagem e de espera do veículo (veículo ficar parado durante a rota). Essa formulação também usa uma relaxação de algumas restrições permitindo a obtenção de soluções inactíveis que vão sendo eliminadas na execução do procedimento heurístico adotado.

A meta-heurística foi implementada em C# e a implementação acabou apresentando tempo de execução elevado e gerando soluções não factíveis. Além disso, a qualidade de resultados da ILS depende diretamente de sua função de perturbação, que permite escapar de ótimos locais. O movimento e nível de perturbação adequados para obter melhores resultados nesse estudo de caso não foram encontrados.

As principais dificuldades encontradas na aplicação real da roteirização de veículos foram observadas ao longo desse trabalho, primeiramente a modelagem do problema precisa passar por muitos ajustes devido à ausência de dados, e segundo, cada problema é específico e precisa de calibração dos métodos de solução. No entanto, apesar das dificuldades em comprovar que o uso da roteirização seja capaz de reduzir custos considerando, em conjunto, o conforto do usuário, o objetivo de estudar uma aplicação real foi atingido.

6.1 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Na modelagem, a principal limitação é o não conhecimento da sequência real de visitas (rota real) praticada pelas empresas em análise e sim apenas a lista de requisições atendidas. Esse conhecimento possibilitaria o uso da própria rota real como solução inicial e possibilitaria

outras análises como a de oferta do serviço e comparação dos tempo de viagem do usuário. Outra limitação da modelagem é o cálculo das distâncias e tempo de viagem entre pontos, que são normalmente um limitador da qualidade dos resultados de estudos de roteirização. A distância, mesmo que fosse calculada com base na rede real, poderia não representar o caminho executado pelo motorista para percorrer um ponto a outro. Já o tempo, estimado através de velocidade constante não consegue reproduzir com exatidão as inconveniências do tráfego.

Em relação ao método de solução, não foi possível encontrar uma configuração que eliminasse todas as soluções infactíveis, tendo assim, não apenas rotas que não são melhores, mas também não são praticáveis. E por último, tem-se o fator da experiência e do comportamento humano que não pode ser modelado. Por exemplo, a serviço lida com situações onde alguns usuários não podem usar o sistema no mesmo instante e no mesmo veículo, simplesmente por existir desavenças pessoais entre eles. Também lida com a situação de usuário que são mais flexíveis quanto aos tempos de percurso e outros mais exigentes. Existem, assim, situações que são difíceis de serem solucionadas por um sistema de roteirização.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomenda-se duas direções de continuação ou melhoria desse estudo: melhorar a análise do cronograma fixo usando outras metodologias, considerações mais precisas ou outra forma de cálculo das distâncias e tempo de viagem entre os pontos; ou passar a considerar a etapa dinâmica do sistema, ou seja, aceitando o cronograma fixo e estudar a otimização da inserção de novas requisições. Para a primeira consideração de prosseguimento do trabalho sugere-se tentar o uso de outra meta-heurística para comparação de resultados ou alterar os movimentos de geração de vizinhança e perturbação dessa mesma, além de buscar a obtenção de mais dados da rota que permitam comparar de forma mais direta a rota proposta com a real.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTE PÚBLICOS. **Sistema de informações da mobilidade urbana: relatório geral 2014**. [São Paulo]: ANTP, 2016.

ANJOS, D. **Princípios do serviço público no direito administrativo**. Jusbrasil. Disponível em <<https://danieledanhos.jusbrasil.com.br/artigos/405074318/principios-do-servico-publico-no-direito-administrativo>> Acesso em: 22 maio 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14022/2009: **Acessibilidade em veículos de características urbanas para o transporte coletivo de passageiros**. 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO. **Anuário NTU: 2015-2016**. Brasília: NTU, 2016. 60 p.

ATTANASIO, A. et al. Parallel tabu search heuristics for the dynamic multi-vehicle dial-a-ride problem. **Parallel Computing**, v. 30, n. 3, p. 377-387, 2004.

BABA, C. M. et al. Otimização da colônia de formigas aplicada ao problema da programação e roteirização de veículos para o transporte de pessoas portadoras de deficiência. **Revista Produção Online**, v. 4, n. 4, 2004.

BARONI, A. C.; RESENDE, A. P. C. Construindo a mobilidade cidadã: os movimentos sociais. In: ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Acessibilidade nos transportes**. (Cadernos Técnicos). São Paulo: ANTP, 2006. p. 9-12.

BAUGH, J. W.; KAKIVAYA, G. K. R.; STONE, J. R. Intractability of the dial-a-ride problem and a multiobjective solution using simulated annealing. **Engineering Optimization**, v. 30, n. 2, p. 91-123, 1998.

BERGVINSDOTTIR, K. B. The genetic algorithm for solving the dial-a-ride problem. 2004. Dissertação (Mestrado). Technical University of Denmark, DTU, DK-2800 Kgs. Lyngby, Denmark, 2004.

BRAEKERS, K.; CARIS, A.; JANSSENS, G. K. Exact and meta-heuristic approach for a general heterogeneous dial-a-ride problem with multiple depots. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 67, p. 166-186, 2014.

BRASIL. **Decreto nº 5.296 de 2 de dezembro de 2004**. Regulamenta as Leis nos 10.048, de 8 de novembro de 2000 e 10.098, de 19 de dezembro de 2000. Estabelece normas gerais e critérios básicos para a promoção da acessibilidade das pessoas com deficiência ou com mobilidade reduzida, e dá outras providências.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Implantação de sistemas de transporte acessíveis**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006a. 90 p.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Boas práticas de acessibilidade**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006b. 90 p.

BRASIL. Secretaria de Direitos Humanos. **Convenção sobre o direito das pessoas com deficiência**. Brasília: Secretaria de Direitos Humanos, 2011. 100 p.

BODIN, L. et al. Routing and scheduling of vehicles and crews: the state of art. **Computers and Operational Research**, v. 10, n. 2, p. 63-2011, 1983.

BODIN, L.; GOLDEN, B. Classification in vehicle routing and scheduling. **Networks**, v.11, n. 2, p. 97-108, 1981.

CORDEAU, J.F.; LAPORTE G. A tabu search heuristic for the static multi-vehicle dial-a-ride problem. **Transportation Research Part B**, v. 37, n. 6, p. 579-594, 2003.

CORDEAU, J. F. A Branch-and-cut algorithm for the dial-a-ride problem. **Operations Research**, v.54, n. 3, p. 573-586, 2006.

CUNHA, C. B. Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais. **Revista dos Transportes**, v. 8, n. 2, 2000.

DESROSIERS, J.; DUMAS, Y.; SOUMIS, F. A dynamic programming solution of the large-scale single-vehicle dial-a-ride problem with time windows. **The American Journal of Mathematical and Management Sciences**, v. 6, n. 3-4, p. 301-325, 1986.

DUMAS, Y.; DESROSIERS, J.; SOUMIS, F. The pickup and delivery problem with time windows. **European journal of operational research**, v. 54, n. 1, p. 7-22, 1991.

EMPRESA MUNICIPAL DE DESENVOLVIMENTO DE CAMPINAS S.A. **PAI Serviço**. Disponível em: <<http://www.emdec.com.br/eficiente/sites/portalemdec/pt-br/site.php?secao=pai&pub=12191>>. Acesso em: 21 maio 2017.

ESPECIAL COOP. **Especial Coop Transporte Acessível**. Disponível em: <<http://www.especialcoop.com.br/>>. Acesso em: 21 maio 2017.

ESTADOS UNIDOS, United States Department of Justice. **A guide to disability rights laws**. United States Department of Justice, 2009.

ESTADOS UNIDOS. United States Department of Justice. **Introduction to the ADA**. Disponível em: <https://www.ada.gov/ada_intro.htm>. Acesso em: 22 maio 2017.

FARIA, A. et al. Dial-a-ride routing system: the study of mathematical approaches used in public transport of people with physical disabilities. In: **12º WCTR**. 2010.

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E. **Transporte público urbano**. 2. ed. São Carlos: Rima, 2004. 428 p.

FRAGA NETO, A. **Programação e roteirização dinâmica de veículos aplicado ao serviço de transporte de cadeirantes**. 2015. 147 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2015.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO URBANO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE JOINVILLE. **Joinville Cidade em dados 2016**. Joinville: Prefeitura Municipal de Joinville, 2016. 158 p.

GIDION (Joinville). **Transporte eficiente**: há mais de uma década em Joinville. 2016. Disponível em: <<http://www.gidion.com.br/servicos/transporte-eficiente/>>. Acesso em: 29 set. 2016.

GIDION (Joinville). **A História do transporte em Joinville**. Disponível em: <<http://www.gidion.com.br/a-historia-do-transporte-em-joinville/>>. Acesso em: 08 jun. 2017.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

GOMES, F. A. M. **Busca local iterada**. 2009. 17 slides. Apresentação PowerPoint.

GUIA DE DIREITOS. **Transporte público coletivo**. Disponível em: <http://guiadedireitos.org/index.php?option=com_content&view=article&id=1248&Itemid=292> Acesso em: 22 maio 2017.

HAIDEMANN, H. P. **O problema dial-a-ride estático**: Estudo de caso para o transporte escolar. 2007. 148p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Departamento de Matemática, Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2007.

JAW, J. et al. A heuristic algorithm for the multi-vehicle advance request dial-a-ride problem with time windows. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 20, n. 3, p. 243-257, 1986.

JOINVILLE. **Lei Ordinária nº 4288 de 22 de dezembro de 2000**. Isenta do pagamento da tarifa de ônibus convencional, no serviço regular do transporte coletivo do município de Joinville e dá outras providências.

KAISER, M. S. **Aplicação de meta-heurística híbrida na resolução do problema dial-a-ride**. 2009. 70 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Engenharia de Transportes, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2009.

MADSEN, O. B. G.; RAVN, H. F.; RYGAARD, J. M. A heuristic algorithm for a dial-a-ride problem with time window, multiple capacities, and multiple objectives. **Annals of Operational Research**, n.60, p. 193-208, 1995.

MAURI, G. R. **Novas abordagens para representação e obtenção de limitantes e soluções para alguns problemas de otimização combinatória**. 2008. 239 p. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos–SP, 2008.

MAURI, G. R.; LORENA, L. A. N. Uma nova abordagem para o problema *dial-a-ride*. *Produção*, v. 19, n. 1, p. 41-54, 2009.

NOVAES, A. G. N. **Sistemas Logísticos**: transportes, armazenagem e distribuição física de produtos. E. Blucher, 1989.

OLIVEIRA, E. M.; AMARAL, A. R. S. Desenvolvimento de um algoritmo de busca local iterada para o problema dial-a-ride. In: **XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. 2015. p. 2370-2381.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DA SAÚDE. **Relatório mundial sobre a deficiência**. Tradução: SÃO PAULO (Estado). Secretaria dos Direitos das Pessoas com Deficiência. São Paulo: SEDPCD, 2012. 334 p.

PARRAGH, S. N. et al. Models and algorithms for the heterogeneous dial-a-ride problem with driver-related constraints. **OR Spectrum**, v. 34, n. 3, p. 593-633, 2012.

PARRAGH, S. N.; SCHMID, V. Hybrid column generation and large neighborhood search for the dial-a-ride problem. **Computers & Operations Research**, v. 40, n. 1, p. 490-497, 2013.

PASSEBUS. Dados para TCC. [Mensagem Pessoal]. Mensagem recebida por <flaviahaweroth@gmail.com> em 17 abr. 2017.

PSARAFTIS, H. N. A dynamic programming approach for sequencing groups of identical jobs. **Operations Research**, v. 28, n. 6, p. 1347-1359, 1980.

PSARAFTIS, H. N. An exact algorithm for the single vehicle many-to-many dial-a-ride problem with time windows. **Transportation Science**, v. 17, n. 3, p. 351-357, 1983.

REVISTA EXAME. **São Paulo conta com uma das maiores frotas de “Táxi Acessível” do Mundo**. 2015. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/negocios/dino/sao-paulo-conta-com-uma-das-maiores-frotas-de-taxi-acessivel-do-mundo-shtml/>>. Acesso em: 22 maio 2017.

RODRIGUES, P. P.; ROSA, R. A.; RESENDO, L. C. Proposta de um modelo matemático para o problema dial-a-ride aplicado ao transporte público de cadeirantes. **Transportes**, v. 20, n. 2, p. 33-41, 2012.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Transporte adaptado**. Disponível em: <http://www.sjc.sp.gov.br/secretarias/mobilidade_urbana/transporte_adaptado.aspx>. Acesso em: 19 maio 2017.

SÃO PAULO (Cidade). **Serviço Atende para transporte de pessoas com deficiência utilizará táxis acessíveis**. 2014. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/pessoa_com_deficiencia/noticias/?p=166838>. Acesso em: 22 maio 2017.

SÃO PAULO TRANSPORTES (São Paulo). **Atende**. 2016. Disponível em: <http://www.sptrans.com.br/passageiros_especiais/atende.aspx>. Acesso em: 26 set. 2016.

SAVELSBERGH, M. W. P. The vehicle routing problem with time windows: minimizing route duration. **ORSA Journal on Computing**, v. 4, n. 2, p. 146-154, 1992.

SILVEIRA, C. S. **Acessibilidade espacial no transporte público urbano: estudo de caso em Joinville- SC**. 2012. 210 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2012.

SINDICATO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE METROPOLITANO DA GRANDE VITÓRIA. **Aumenta o atendimento do mão na roda**. Disponível em: <http://www.gvbus.com.br/noticias/index_system.php?id=283>. Acesso em: 16 abr. 2017.

SOUZA, L. D. F.; MARQUES, R. O. Abordagem crítica sobre os direitos humanos e a proteção das pessoas portadoras de necessidades especiais. **Revista Juris Poiesis**, v. 19, n. 19, p. 2 - 14, 2016.

TOTH, P.; VIGO, D. Fast local search algorithms for the handicapped persons transportation problem. In: **Meta-Heuristics**. Springer US, 1996. p. 677-690.

TOTH, P.; VIGO, D. Heuristic algorithms for the handicapped persons transportation problem. *Transportation Science*, v. 31, n. 1, p. 60-71, 1997.

TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *Vehicle routing: problems, methods, and applications*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2014.

TRANSTUSA. **Serviços**. Disponível em: <<http://www.transtusa.com.br/servicos/>>. Acesso em: 19 jun. 2017.

WRIGHT, C. L. (Ed.). **Facilitando o transporte para todos**. IDB, 2001.

ZNAMENSKY, A.; CUNHA, C. B. Um modelo para o problema de roteirização e programação do transporte de deficientes. In: **Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**. 1999. p. 59-62.