RENATO OLIVEIRA ARBEX

**PROJETO DE REDES ESTRUTURAIS OTIMIZADAS DE
TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS**

SÃO PAULO

2020

RENATO OLIVEIRA ARBEX

**PROJETO DE REDES ESTRUTURAIS OTIMIZADAS DE
TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS**

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

SÃO PAULO

2020

RENATO OLIVEIRA ARBEX

**PROJETO DE REDES ESTRUTURAIS OTIMIZADAS DE
TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO URBANO POR ÔNIBUS**

Versão Corrigida

(Versão original encontra-se na unidade que aloja
o Programa de Pós-Graduação)

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências

Área de Concentração:
Engenharia de Transportes

Orientador: Prof. Titular
Claudio Barbieri da Cunha

SÃO PAULO

2020

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Arbex, Renato Oliveira

Projeto de redes estruturais otimizadas de transporte público coletivo urbano por ônibus / R. O. Arbex – versão corr. -- São Paulo, 2020.
258 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Projeto de redes de transporte 2.Transportes públicos 3.Meta-heurísticas
4.Algoritmos Genéticos 5.Bilhetagem Eletrônica I.Universidade de São Paulo.
Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto de muita dedicação e só se tornou realidade com o ajuda e colaboração de muitas pessoas. Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Claudio Barbieri da Cunha, pela constante inspiração para buscar o primor no trabalho assim como pelas contribuições, orientações e discussões inteligentes sobre o tema ao longo dos anos. Ao Prof. Dr. Orlando Strambi, pelos ricos aportes ao longo do meu mestrado, assim como na qualificação do meu doutorado. À Prof^a. Dr. Luciana Salete Buriol, pela participação na qualificação do doutorado com sugestões e importantes contribuições.

Agradeço também a minha família, pelo apoio constante e incentivos de todas as formas. Aos meus amigos Cauê Guazzelli, pelas palavras de apoio, conversas de incentivo e conselhos; Bruna Pizzol, pelas conversas e suporte; Glaucia Pereira, pela amizade nessa jornada e Roberto Speicys, pelas animadas conversas e trocas de ideias.

Ao CNPq e à CAPES, pelo apoio financeiro ao longo desta jornada; ao Centro Universitário FEI, pela oportunidade de iniciar a carreira acadêmica como professor; à SPTrans, pela oportunidade de contribuição para um sistema de transporte público cada vez melhor na cidade de São Paulo, e, por fim, à USP, pelo ambiente de desenvolvimento intelectual que estimula a criação e divulgação de conhecimento científico de ponta.

RESUMO

O presente trabalho trata do problema do projeto de redes estruturais de transporte público coletivo por ônibus, ou seja, da definição do itinerário e das frequências das linhas de ônibus a serem operadas em uma área urbana. O objetivo do trabalho é apresentar uma metodologia de projeto de linhas estruturais de ônibus para a operação entre terminais de transporte público em uma cidade de médio a grande porte. As linhas estruturais representam os serviços de transporte público de maior capacidade, que percorrem as áreas mais centrais dos centros urbanos e troncalizam o sistema. A rede é criada de tal forma a minimizar custos de usuários (tempos de viagem, espera e transferências) e operadores (frota), constituindo um problema multiobjetivo. Para o projeto da rede estrutural, é proposto um método de solução em quatro níveis: primeiro as rotas são compostas por sequência de terminais atendidos, no segundo, o itinerário das rotas entre os terminais é definido; no terceiro, é realizada a alocação da demanda à rede para o cálculo das frequências das linhas, da frota necessária para operação do sistema e de indicadores de qualidade da rede: custo generalizado médio por viagem, número médio de transferências por viagem e percentual da demanda não atendida pela rede estrutural; no quarto, são incluídas as linhas locais do sistema. A busca por soluções mais eficientes é realizada nos primeiros dois níveis através da aplicação da meta-heurística Algoritmos Genéticos buscando minimizar distintos objetivos: no primeiro nível, custo generalizado total da rede e frota necessária para operação; no segundo, número de transferências e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural. Além de apresentar objetivos conflitantes entre usuário e operador, o problema de projeto de redes de transporte público possui muitas restrições que devem ser consideradas: frequência, capacidade, frota, extensão das rotas, linearidade, conectividade e atendimento aos nós de demanda. Como dados de entrada, são necessários a matriz de demanda entre nós de um sistema viário codificado, a quantidade e localização dos terminais e informações sobre tempos de viagem nos *links*. Nesta tese, para a elaboração da matriz de demanda são utilizados dados de bilhetagem eletrônica como entrada para uma metodologia de estimação de matrizes origem-destino de viagens entre pontos de parada do sistema. Nesta tese são realizados experimentos computacionais utilizando como estudo de caso a Rede da Madrugada, o serviço de transporte público por ônibus que opera no horário da madrugada (entre meia-noite e 4h) na cidade de São Paulo, com uma rede de 343 nós e 1202 *links* criada para esta aplicação. A análise de sensibilidade para o projeto da rede evidenciou características das melhores soluções após geração de um enorme conjunto de soluções válidas. Resultados da análise de sensibilidade do algoritmo demonstram que o reprojeto das linhas estruturais permite a redução do número médio de transferências assim como da frota. Cinco soluções foram selecionadas dentre as melhores da análise de sensibilidade para avaliação em conjunto com a rede de linhas locais. Essas soluções apresentaram bom *trade-off* dos atributos e uma delas reduz o custo generalizado médio das viagens no sistema estrutural em 14%, a frota em 4% e o número médio de transferências em 36%, quando comparada à rede estrutural em operação no dia da análise. Também foram realizados experimentos para avaliar a mudança da quantidade de terminais na qualidade das soluções, diferentes quantidades possíveis de itinerários entre os terminais, assim como a robustez das soluções quanto à demanda variável ao longo de uma semana.

Palavras-chave: Projeto de Redes de Transporte. Transporte Público. Meta-heurísticas. Algoritmos Genéticos. Bilhetagem Eletrônica.

ABSTRACT

This thesis deals with the trunk bus network design problem, which can be defined as follows: to determine trunk bus routes to be operated, as well as their respective itineraries and frequencies in an urban area. The objective is to propose a design method for trunk bus routes for operation between public transport terminals in a medium to large-sized city. Trunk lines represent larger capacity services that run through the most central areas of urban centers, establishing the public transport system backbone. The network is created in such a way as to minimize user costs (travel times, waiting and transfers) and operators costs (fleet), thus denoting a multiobjective problem. For the design of the trunk network, a four-level solution method is proposed: firstly, routes are created with the sequence of terminals served; in the second level, all routes itineraries between terminals are defined. In the third level, the demand is assigned to the network to calculate line frequencies, total fleet required for system operation and network quality indicators: average generalized cost per trip, average number of transfers per trip and percentage of demand not met by the resulting trunk network. The fourth level also comprises local bus lines serving the neighborhoods of the trunk terminals. The search for more efficient solutions is performed in the first two levels by applying the well-known Genetic Algorithms meta-heuristic seeking to minimize different objectives: in the first level, total generalized cost of the network and fleet required for operation; in the second level, number of transfers and percentage of unmet demand by the trunk network. In addition to conflicting objectives between users and operators, the problem of designing public transport networks has many constraints that must be considered: frequency, capacity, fleet, route length, linearity, connectivity and serving demand nodes. The required input data consists of the demand matrix between nodes of a simplified road system, the number and location of terminals as well as travel time information on the road system links. In this thesis, for the demand matrix, smart card data is used as input to a methodology that estimates origin-destination trip matrices between bus stops. Computational experiments are performed using the so-called 'Rede da Madrugada', the public bus service that operates at dawn (between midnight and 4 am) in the city of São Paulo, with a network of 343 nodes and 1202 links created for this application as a case study. Sensitivity analyses that have been conducted show the characteristics of the best solutions after generating a huge set of valid solutions. The results obtained from the sensitivity analyses of the algorithm demonstrate that the trunk bus network redesign allows the reduction of the average number of transfers as well as fleet reductions. Five solutions were selected among the best obtained through sensitivity analysis for evaluation in conjunction with the local bus lines network. One of these solutions has shown good *trade-off* of attributes and reduces the average generalized cost of travel in the trunk bus system by 14%, fleet by 4% and the average number of transfers by 36% when compared to the current network. Experiments were also performed to evaluate how changes in the number of terminals affect solution quality, different possible number of routes between the terminals as well as the robustness of the solutions regarding variable demand over a week.

Keywords: Network Design. Public Transport. Trunk-feeder. Metaheuristics. Genetic Algorithms. Smart card.

PUBLICAÇÕES RELACIONADAS DURANTE O DOUTORADO

Artigos em Revista revisados por pares (2015-2020):

1. **Arbex, R. O.,** & Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 355-376. (artigo publicado com base na pesquisa de mestrado sobre o mesmo tema)
2. **Arbex, R.,** Pacifici, M., Rios, L., Giannotti, M. A., & Carneiro, C. (2016). Análise Espacial da Acessibilidade no Município de São Paulo através de Self Organizing Maps. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(4).
3. **Arbex, R. O.,** & Cunha, C. B. (2016). Avaliação das mudanças nas velocidades das linhas de ônibus da cidade de São Paulo após a implantação de faixas exclusivas através da análise de dados de GPS. *Transportes*, 24(4), 21-31.
4. **Arbex, R. O.,** & Cunha, C. B. (2017). Estimação da matriz origem-destino e da distribuição espacial da lotação em um sistema de transporte sobre trilhos a partir de dados de bilhetagem eletrônica. *Transportes*, 25(3), 166-177.
5. **Arbex, R. O.,** & Cunha, C. B. (2019). Before-and-After Evaluation of a Bus Network Improvement Using Performance Indicators from Historical Smart Card Data. *Public Transport*. <https://doi.org/10.1007/s12469-019-00214-z>
6. **Arbex, R. O.,** & Cunha, C. B. (2020). Estimating the Influence of Crowding and Travel Time Variability on Accessibility to Jobs in a Large Public Transport Network Using Smart Card Big Data. *Journal of Transport Geography*. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102671>

Apresentações em conferências, como primeiro autor (2015-2019):

1. **Arbex, R. O.**, Alves, B. B., & Giannotti, M. A. (2016). Comparing Accessibility in Urban Slums Using Smart Card and Bus GPS Data (No. 16-5614). Transportation Research Board 95th Annual Meeting. Washington, D.C, USA.
2. **Arbex, R. O.**, & Torres, S.R. (2017). Variability in Transit Supply and Demand: Mapping Level of Service and Crowding in São Paulo Using Smart Card and GPS Data. Transit Data 2017: 3rd International Workshop and Symposium on research and applications on the use of passive data from public transport.
3. **Arbex, R. O.**, Cunha, C. B. & Speicys, R. (2018). Before-and-After Evaluation of a Bus Network Improvement Using Performance Indicators from Historical Smart Card Data. Conference on Advanced Systems in Public Transport (CASPT) and Transit Data 2018. Brisbane, Australia.
4. **Arbex, R. O.**, & Cunha, C. B. (2018). Uma Avaliação do Impacto do Desabastecimento de Combustível Durante a Greve dos caminhoneiros no sistema de transporte público de São Paulo: Efeitos na Lotação, na Velocidade das Viagens e na Regularidade dos Usuários. ANPET XXXII. Gramado, RS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Foto de um ponto de parada em Chicago, EUA.	11
Figura 2.2: Terminal Santo Amaro em São Paulo.....	12
Figura 2.3: Tipos de rede de transporte público.	14
Figura 2.4: Rede de transporte público por ônibus de Oxford, Inglaterra.	15
Figura 2.5: Mapa parcial da rede de transporte público por ônibus de Auckland, Nova Zelândia.	16
Figura 2.6: Mapa conceitual do sistema tronco-alimentado de Seul.....	17
Figura 2.7: Mapa do sistema Transmilenio, indicando linhas estruturais troncais em vermelho, azul e amarelo, e linhas alimentadoras locais em cinza.	18
Figura 2.8: Rede em <i>grid</i> de Barcelona.	19
Figura 3.1: Estrutura de tomada de decisão no processo de planejamento contínuo de transportes.....	24
Figura 3.2: Interação entre as etapas do processo de planejamento do transporte público por ônibus.	26
Figura 3.3: Classificação e Nomenclatura dos problemas de projetos de rede de transporte público.	27
Figura 3.4: Diagrama heurístico típico do PRTP.	49
Figura 3.5: Representação em <i>string</i> de uma solução do PRTP, onde n_x representa um nó da rede.	50
Figura 3.6: Representação com <i>string</i> binária.	51
Figura 3.7: Método de solução aplicado em Afandizadeh <i>et al.</i> (2013).....	52
Figura 3.8: Fluxograma do método utilizado em Arbex e Cunha (2015).....	53
Figura 3.9: Descrição das heurísticas de modificação de rotas aplicadas em Ahmed <i>et al.</i> (2018). Arcos retos são links na rota, arcos tracejados são links removidos e arcos curvos são links adicionados após a aplicação da heurística.....	55
Figura 4.1: Rede inviável pois as rotas não estão conectadas. Os nós que compõem a rota em verde estão isolados dos demais nós da rede.	72
Figura 5.1: Estrutura Geral do método de solução proposto para o projeto da rede estrutural.	77

Figura 5.2: Fluxograma do processamento de dados de bilhetagem eletrônica e GPS dos veículos.....	80
Figura 5.3: Representação por mapas dos elementos do sistema viário estrutural para a região de Pinheiros, São Paulo: sistema de vias estruturais denominado VEIO (acima), pontos de parada e terminal regional (meio) e representação computacional (abaixo).	83
Figura 5.4: Fluxograma do Nível 1 do projeto da rede estrutural.	85
Figura 5.5: Rede Estrutural com o Diagrama de <i>Voronoi</i> dos nós.....	87
Figura 5.6: Nós associados a um Terminal.	88
Figura 5.7: Área de agregação da demanda dos terminais para a região central de São Paulo.	88
Figura 5.8: Mapa ilustrando algumas conexões entre terminais possíveis, saindo do Terminal Vila Madalena em uma rota que vai sentido zona leste da cidade de São Paulo. O mapa representa apenas uma pequena parcela das ligações possíveis, de modo a ilustrar as possibilidades de linhas geradas pelo algoritmo.....	92
Figura 5.9: Pseudocódigo do algoritmo que cria o banco de rotas estruturais entre terminais para busca no Nível 1.	93
Figura 5.10: Pseudocódigo do Algoritmo Genético Estrutural aplicado no Nível 1.....	96
Figura 5.11: Representação de uma solução.	97
Figura 5.12: Pseudocódigo do cálculo da Frota Total aplicado no Nível 1.....	105
Figura 5.13: Exemplo de cruzamento uniforme.	106
Figura 5.14: Soluções de Pareto (não-dominadas) no espaço das funções para as funções de aptidão f_1 e f_2	109
Figura 5.15: Fluxograma do Nível 2 do projeto da rede estrutural.	111
Figura 5.16: Verificação de desvio de tempo de viagem ao longo do itinerário.....	113
Figura 5.17: Pseudocódigo do algoritmo que cria o Banco Itinerários.	115
Figura 5.18: Exemplo de caminhos criados para o par de Terminais Vila Madalena e Vila Mariana, em São Paulo.....	117
Figura 5.19: Exemplo de caminhos adicionados ao Banco de Rotas para o par de Terminais Vila Mariana – Pirituba, considerando um número máximo de 10 rotas.	118

Figura 5.20: Distância d utilizada para o cálculo do tempo de processamento de cada solução no Nível 2.	119
Figura 5.21: Pseudocódigo do Genético Itinerários aplicado no Nível 2.	121
Figura 5.22: Representação do Cromossomo para o Genético Itinerários.	122
Figura 5.23: Exemplo de definição de itinerários possíveis para uma linha Term. Sacomã – Term. Vila Mariana – Term. Lapa – Term. Pirituba.	124
Figura 5.24: Fluxograma do processamento no Nível 3.	128
Figura 5.25: Pseudocódigo do cálculo da frequência e demais indicadores usando extended transit assignment do EMME.	130
Figura 5.26: Fluxograma dos procedimentos no Nível 4.	132
Figura 5.27: Exemplo do viário provável no sistema viário real que representam os <i>links</i> estruturais, exemplo para região da Zona Leste, São Paulo.	134
Figura 5.28: Pontos de parada atendidos para a linha com sequência de nós 279-280-284-70-71 a partir da metodologia aplicada no Nível 4.	135
Figura 5.29: Exemplo da interface do OTP para um itinerário na rede de transporte público.	137
Figura 6.1: Links e Nós do Viário Estrutural modelado.	145
Figura 6.2: Matriz OD após agregação aos terminais (viagens agregadas ao mesmo terminal na origem e no destino foram desconsideradas nesta agregação).	146
Figura 6.3: Matriz de viagens entre terminais estimada para a madrugada do dia 27/10/2017 entre 0h e 1h.	147
Figura 6.4: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando extensão máxima das linhas da rede como agrupamento.	155
Figura 6.5: Matriz de dispersão para extensão média das linhas, número de linhas e tempo de viagem dentro do veículo, considerando extensão máxima das linhas da rede como agrupamento.	156
Figura 6.6: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando número de linhas de entrada para agrupamento.	157
Figura 6.7: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, utilizando desvio máximo como agrupamento.	158

Figura 6.8: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando desvio máximo como agregação.	159
Figura 6.9: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando número de linhas de entrada como agregação.....	161
Figura 6.10: Exemplo da evolução do menor custo generalizado encontrado até então ao longo das gerações no Nível 1.	163
Figura 6.11: Dispersão dos custos generalizados x frota total no Nível 1 por número de linhas na solução.	166
Figura 6.12: Média de indicadores selecionados para as melhores soluções no Nível1 em função do número de linhas na solução.....	167
Figura 6.13: Terminal de origem e destino das linhas mais comuns nas melhores soluções.	168
Figura 6.14: Ligações diretas mais utilizadas nas melhores soluções.....	170
Figura 6.15: Matriz do percentual de ligações diretas entre os terminais das melhores soluções.	171
Figura 6.16: Matriz de dispersão para número de transferências, percentual 2 ou mais transferências e quantidade de nós não atendidos média das soluções válidas no nível 2, considerando número de linhas de entrada como agrupamento.	175
Figura 6.17: Matriz de dispersão para número de transferências, distância média das linhas e quantidade de nós não atendidos médio das soluções válidas no nível 2, considerando desvio máximo de linhas de entrada como agrupamento.	176
Figura 6.18: Matriz de dispersão para número de transferências, percentual 2 ou mais transferências e frota (obtida no nível 1) considerando número de linhas na solução como agrupamento, para as melhores soluções do nível 2.....	177
Figura 6.19: Matriz de dispersão para número de transferências, frota (obtida no nível 1) e quantidade de nós não atendidos, considerando número de linhas de entrada como agrupamento, para as melhores soluções do nível 2.....	178
Figura 6.20: Distribuição de usos nas soluções dos itinerários entre os nós dos terminais Vila Madalena e Pinheiros, considerando até 1,5 (50%) de desvio no tempo de viagem.....	179

Figura 6.21: Exemplo da evolução das soluções no Nível 2 quanto ao número total de transferências para 10 soluções de Pareto encontradas no Nível 1 (35-39 linhas, 1,4 (40%) de desvio máximo, extensão máxima de 25 km, rodada número 4 de 5).....	180
Figura 6.22: Exemplo de evolução no Nível 2 para 5 execuções do algoritmo com os parâmetros: 35-39 linhas, 1,4 desvio máximo e extensão máxima de 25 km.	181
Figura 6.23: Box-plot da frota necessária para atender a demanda para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.....	183
Figura 6.24: Box-plot do percentual de demanda não-atendida pela rede estrutural para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.	184
Figura 6.25: Box-plot do custo generalizado médio por viagem para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.....	185
Figura 6.26: Matriz de dispersão para custo generalizado médio dos usuários, frota e percentual da demanda não atendida pela rede estrutural considerando número de linhas de entrada como agrupamento.	186
Figura 6.27: Box-plot do número médio de transferências x frota da solução para todas as soluções no Nível 3.	187
Figura 6.28: Número médio de transferências vs distância média das linhas com relação do número de linhas na solução.....	188
Figura 6.29: Dispersão da distância média das linhas e frota para diferentes números de linhas na solução.	189
Figura 6.30: Box-plot da distância média das linhas nas soluções vs número de linhas para todas as soluções finais avaliadas no Nível 3.	192
Figura 6.31: Box-plot da distância média das linhas nas soluções vs número de linhas para as melhores soluções no Nível 3 (atributos melhores que rede atual).	192
Figura 6.32: Filtro das melhores soluções do Nível 3 que superam a solução atual nos seguintes critérios: demanda alocada, número médio de transferências, tempo de viagem médio, frota, custo generalizado médio e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural.	194
Figura 6.33: Efeito do número de terminais adotados na solução nas funções objetivo custo generalizado médio e frota, assim como no percentual da demanda não atendida pela rede estrutural, para número de terminais variando de 28 a 33.....	200

Figura 6.34: Demanda média das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máxima por par.....	201
Figura 6.35: Média do tempo de viagem das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máximas por par.....	202
Figura 6.36: Matriz de dispersão para quantidade de nós não atendidos pela rede estrutural, percentual de 2 ou mais transferências e número de transferência para todas as soluções finais do Nível 2, considerando quantidade k máxima de linhas no Banco Itinerário para classificação.	205
Figura 6.37: Matriz de dispersão considerando frota, custo generalizado médio e percentual da demanda não atendida pela rede estrutural para todas as soluções do Nível 3, considerando k máximo de linhas como agrupamento.	206
Figura 6.38: Tempo médio de viagem nas melhores soluções no Nível 3 x número máximo k de rotas no Banco Itinerários.	207
Figura 6.39: Número médio de transferências para todas as soluções finais de 5 execuções, para demandas da faixa horária de 00h30 até 01h30 para 7 dias ao longo de uma semana típica.	210
Figura 6.40: Percentual de demanda não atendida pela rede estrutural para todas as soluções finais de 5 rodadas, para demandas da faixa horária de 00h30 até 01h30 para 7 dias ao longo de uma semana típica.	211
Figura C.1: Ilustração do processo de estimativa do ponto de parada onde ocorreu cada transação em ônibus.....	251
Figura C.2: Exemplo ilustrativo da metodologia de inferência de local de desembarque das transações.....	253
Figura C.3: Representação esquemática de um exemplo de uma sequência de viagens inferidas pelas transações.	256

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Termos e referências indicados.	22
Tabela 4.1: Atendimento às restrições.....	71
Tabela 6.1: Localização e identificação dos Terminais do estudo de caso.	144
Tabela 6.2: Parâmetros de entrada nas análises de sensibilidade realizadas neste Capítulo. .	148
Tabela 6.3: Entrada da análise de sensibilidade realizada com relação ao número e características das linhas.....	150
Tabela 6.4: Características dos Bancos de Rotas Candidatas para as combinações de extensão máxima e desvio máximo permitido.	152
Tabela 6.5: Número de Soluções válidas no Nível 1 na Análise de Sensibilidade.	154
Tabela 6.6: Comparação dos menores valores de custo generalizado entre as 5 rodadas para cada conjunto de dados de entrada da análise de sensibilidade.....	162
Tabela 6.7: As 30 linhas mais comuns nas melhores soluções de equilíbrio selecionadas....	169
Tabela 6.8: Média de quantidade de Linhas por Terminal para as melhores soluções no Nível 1 e comparativo com rede atual.....	173
Tabela 6.9: Atributos da Rede Atual para a mesma demanda alocada, utilizados como corte para definição do filtro das melhores soluções do Nível 3.....	190
Tabela 6.10: Quantidade de soluções no filtro das melhores do nível 3 por número de linhas na solução.	191
Tabela 6.11: Comparação de indicadores selecionados das redes escolhidas para avaliação no Nível 4.	195
Tabela 6.12: Atributos das redes selecionadas para avaliação no Nível 4, ao se agregar as linhas da rede estrutural propostas com as linhas locais existentes na rede atual.....	198
Tabela 6.13: Mediana dos valores para indicadores selecionados de todas as soluções no Nível 3 (após alocação no EMME).	199
Tabela 6.14: Número médio de linhas no Banco Itinerários, agrupado por terminal de origem, para diferentes k máximos de linhas.....	203
Tabela 6.15: Número de viagens na faixa horária de 00h30-01h30 ao longo da semana analisada.	208

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura.....	31
Quadro 3.2: Quadro resumo dos aspectos do problema e esta pesquisa.	60

LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmos Genéticos
EMME	Equilibre Multimodal/multimodal Equilibrium
GPS	Global Positioning System
GTFS	General Transit Feed Specification
OD	Origem-Destino
OSM	OpenStreetMap
OTP	OpenTripPlanner
PRTP	Projeto de Rede de Transporte Público
TND	Transit Network Design
TNDFSP	Transit Network Design and Frequencies Setting Problem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização do Problema	1
1.2	Objetivo da Pesquisa	4
1.3	Relevância do Tema	5
1.4	Metodologia Utilizada	6
1.5	Delineamento do Trabalho	8
2	CONCEITOS E TERMOS	10
3	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	Contextualização do Problema	23
3.2	Nomenclatura dos Problemas de Projeto de Redes de Transporte Público	25
3.3	Visão Geral do Projeto de Redes de Transporte Público na Literatura	28
3.4	Funções Objetivo	37
3.5	Restrições	38
3.5.1	<i>Frequências e Intervalos .....</i>	<i>39</i>
3.5.2	<i>Lotação .....</i>	<i>40</i>
3.5.3	<i>Capacidade .....</i>	<i>40</i>
3.5.4	<i>Frota .....</i>	<i>41</i>
3.5.5	<i>Extensão das Rotas .....</i>	<i>41</i>
3.5.6	<i>Linearidade das Linhas e Tempos de Viagem .....</i>	<i>42</i>
3.5.7	<i>Atendimento da Demanda .....</i>	<i>43</i>
3.5.8	<i>Número de linhas .....</i>	<i>43</i>
3.5.9	<i>Transferências .....</i>	<i>43</i>
3.5.10	<i>Área de Cobertura e Espaçamento de Pontos de Parada .....</i>	<i>44</i>
3.5.11	<i>Rotas e Infraestrutura existente .....</i>	<i>44</i>
3.5.12	<i>Nós únicos (viabilidade da rede) .....</i>	<i>44</i>
3.5.13	<i>Atendimento dos nós (viabilidade da rede) .....</i>	<i>45</i>

3.5.14	<i>Rotas Conectadas (viabilidade da rede)</i>	45
3.5.15	<i>Rotas Únicas (viabilidade da rede)</i>	45
3.6	Variáveis de Decisão	45
3.7	Dados de Entrada	46
3.7.1	<i>Matriz de Demanda</i>	46
3.7.2	<i>Sistema Viário</i>	46
3.7.3	<i>Tempos de Viagem</i>	47
3.7.4	<i>Rede e Infraestrutura existente</i>	47
3.8	Métodos de Solução	47
3.8.1	<i>Geração e Configuração de Rotas</i>	48
3.8.2	<i>Construção e Melhoria de Rotas</i>	51
3.8.3	<i>Alocação da Demanda</i>	55
3.9	Instâncias Utilizadas em Experimentos Computacionais e Aplicações	57
3.10	Conclusão Crítica da Revisão da Literatura	59
4	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA	
	62	
4.1	Modelo Matemático	66
4.1.1	<i>Funções Objetivo</i>	69
4.1.2	<i>Restrições</i>	70
4.1.3	<i>Variáveis de Decisão</i>	73
5	MÉTODO DE SOLUÇÃO	74
5.1	Estrutura Geral do Método	75
5.2	Matriz Origem-Destino a partir de Dados de Bilhetagem Eletrônica	78
5.3	Representação da Oferta: Sistema Viário Estrutural	81
5.4	Projeto da Rede Estrutural (Nível 1): Sequência de Terminais atendidos e número de linhas	84
5.4.1	<i>Agregação da Matriz OD aos Nós da Rede Viária Estrutural</i>	85
5.4.2	<i>Agregação da Matriz OD entre Nós aos Terminais</i>	86

5.4.3	<i>Banco de Rotas Candidatas Estruturais entre Terminais</i>	89
5.4.4	<i>Genético Estrutural</i>	94
5.4.4.1	Genético Estrutural: Representação do Cromossomo.....	97
5.4.4.1	Genético Estrutural: População Inicial	98
5.4.4.2	Genético Estrutural: Viabilidade dos Indivíduos	98
5.4.4.3	Genético Estrutural: Aptidão (ou <i>fitness</i>)	99
5.4.4.1	Genético Estrutural: Seleção.....	104
5.4.4.2	Genético Estrutural: Método de Reprodução - Cruzamento.....	106
5.4.4.3	Genético Estrutural: Método de Reprodução - Mutação	107
5.4.4.4	Genético Estrutural: Atualização da População.....	107
5.4.4.5	Genético Estrutural: Exploração do Espaço de Solução.....	107
5.4.4.6	Genético Estrutural: Critério de Parada	108
5.4.4.7	Genético Estrutural: Saída: Fronteira de Pareto.....	108
5.5	Projeto da Rede Estrutural (Nível 2): Itinerário das Linhas	110
5.5.1	<i>Banco de Itinerários Entre Terminais</i>	112
5.5.2	<i>Cálculo do Tempo de Processamento no Nível 2 para cada solução da fronteira do Nível 1</i>	116
5.5.3	<i>Genético Itinerários</i>	120
5.5.3.1	Genético Itinerários: Representação do Cromossomo.....	122
5.5.3.1	Genético Itinerários: População Inicial, Viabilidade dos Indivíduos, Seleção	123
5.5.3.2	Genético Itinerários: Aptidão (ou <i>fitness</i>).....	125
5.5.3.3	Genético Itinerários: Método de Reprodução: Cruzamento e Mutação.....	126
5.5.3.4	Genético Itinerários: Atualização da População, Exploração do Espaço de Soluções e Critério de Parada.....	126
5.5.3.5	Genético Itinerários: Saída: Fronteira de Pareto.....	127
5.6	Projeto da Rede Estrutural (Nível 3): Alocação final e cálculos de custo generalizado e frota total	127
5.6.1	<i>EMME, Extended Transit Assignment e Cálculo das Frequências</i>	129
5.7	Projeto da Rede Estrutural (Nível 4): Detalhamento dos Itinerários para sequência de pontos de parada e avaliação conjunta com rede local existente	131
5.7.1	<i>Definição da Sequência de Pontos de Parada para cada Link Estrutural e Detalhamento do Itinerário das Linhas Estruturais</i>	132
5.7.2	<i>Roteamento usando OpenTripPlanner (OTP)</i>	135
5.8	Considerações finais do capítulo	137

6	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	139
6.1	Implementação Computacional	139
6.2	Estrutura Geral do Estudo de Caso e Dados de Entrada.....	140
6.2.1	<i>Noturno: Rede de Ônibus da Madrugada .....</i>	<i>140</i>
6.2.2	<i>Dados de Entrada: Rede Viária e Matriz OD .....</i>	<i>141</i>
6.2.3	<i>Agregação da Matriz de Viagens entre Pontos de Parada aos Nós .....</i>	<i>142</i>
6.3	Análises de Sensibilidade	142
6.3.1	<i>Número e características das linhas .....</i>	<i>149</i>
6.3.1.1	Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 1): Sequência de Terminais Atendidos e Número de Linhas.....	152
6.3.1.1.1	Características das Melhores Soluções de Equilíbrio no Nível 1	164
6.3.1.1.2	Linhas e ligações mais comuns entre Terminais	164
6.3.1.1.3	Quantidade de linhas por terminal.....	172
6.3.1.1	Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 2): Trajeto Entre Terminais e Estimativa de Transferências	172
6.3.1.2	Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 3): Custo Generalizado e Cálculo da frota	182
6.3.1.3	Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 4): Avaliação conjunta com rede existente	196
6.3.2	<i>Número de terminais operantes na rede .....</i>	<i>197</i>
6.3.3	<i>Número de linhas máximas no Banco Itinerários .....</i>	<i>199</i>
6.3.4	<i>Demanda da Rede.....</i>	<i>207</i>
6.4	Resumo do Capítulo de Experimentos Computacionais	212
7	CONCLUSÕES FINAIS	216
7.1	Contribuições.....	217
7.2	Recomendações para Trabalhos Futuros	220
8	REFERÊNCIAS	222
APÊNDICE A	REVISÃO CRONOLÓGICA DA LITERATURA	236

**APÊNDICE B REVISÃO DA LITERATURA SOBRE BILHETAGEM
ELETRÔNICA NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE PÚBLICO.....244**

B.1 Aplicações de Dados de Bilhetagem Eletrônica 244

B.2 Construção de Matrizes Origem e Destino 245

**APÊNDICE C PROCESSAMENTO DOS DADOS DE BILHETAGEM
ELETRÔNICA PARA ESTIMAÇÃO DA MATRIZ ORIGEM-DESTINO DE
VIAGENS 248**

C.1 Leitura de Dados.....249

C.2 Atribuição da Localização às Transações.....251

C.3 Estimativa do Local de Desembarque das Transações.....252

C.4 Inversão do Sentido das Viagens.....253

C.5 Verificação de validade da transação 254

C.6 Estimativa do horário de desembarque das transações.....255

C.7 Encadeamento das transações para agrupá-las em viagens (trip chaining) 256

C.8 Verificação de validade das viagens.....257

C.9 Estimação da matriz origem-destino usando fator de expansão por cartão.....258

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Problema

Esta tese trata do projeto de redes estruturais otimizadas de transporte público coletivo urbano por ônibus a partir de dados de bilhetagem eletrônica utilizando Algoritmos Genéticos. Uma rede de transporte público coletivo urbano representa o conjunto de linhas de todos os modos de transporte público, sejam linhas de sistemas baseados em trilhos ou pneus. Uma linha representa um itinerário fixo que será percorrido por um ou mais veículos por meio de partidas realizadas com uma determinada frequência, podendo realizar embarque e desembarque de passageiros em pontos de parada localizados ao longo do trajeto percorrido. *Projetar* redes de transporte público coletivo por ônibus significa definir a quantidade de linhas, seus itinerários, suas frequências de operação e os tipos de veículos a serem utilizados em cada uma das linhas que farão parte da rede de transporte público.

Uma rede *estrutural* pode ser definida como um conjunto dos serviços de transporte público que interligam terminais de transporte de uma região urbana com veículos de maior capacidade e frequências elevadas, uma parte de uma configuração de rede de transporte público hierarquizada conhecida como tronco-alimentada.

Esta tese trata do projeto de redes *estruturais* de ônibus, ou seja, o projeto das linhas para a conexão entre terminais de ônibus pré-existentes em uma área urbana. A adoção de uma estrutura tronco-alimentada é uma decisão de projeto de rede por si só. Porém, uma vez construídos terminais de transporte e definida uma infraestrutura de vias dedicadas ao transporte público estrutural (tais como corredores ou faixas exclusivas de ônibus) se possibilita uma configuração de rede com linhas estruturais.

O conceito de projetar redes *otimizadas* implica que os recursos necessários para o oferecimento desses serviços de transporte público sejam minimizados, devendo ao mesmo tempo atender às necessidades de deslocamento dos usuários. Assim, esses dois objetivos que são conflitantes tornam o problema multiobjetivo. Por ser multiobjetivo, não existirá uma única solução ótima, mas sim um conjunto de soluções de compromisso entre os objetivos, trazendo mais desafios à sua solução e à tomada de decisão final.

Os recursos envolvidos na operação do sistema de transporte público por ônibus são compostos principalmente por custos fixos e custos variáveis. Os custos fixos abrangem a quantidade e composição da frota dentre os diferentes tipos e tamanhos de veículos, gastos com pessoal, assim como custos de capital, que incluem depreciação. Já os custos variáveis representam gastos como combustível e reposição de peças e acessórios, diretamente relacionados ao período de operação e à quilometragem total percorrida pelos veículos.

Melhor atender a demanda representa prover linhas de transporte público que liguem da forma mais direta possível as origens aos destinos dos usuários, reduzindo tanto o tempo total de viagem (tempo de acesso aos pontos de parada, tempo de espera pelo veículo e tempo de viagem dentro do veículo) como o número de transferências necessárias entre as linhas.

A presente pesquisa foca exclusivamente no projeto de linhas estruturais do modo *ônibus*. Desta forma, não contempla (ou abrange) uma rede interligada multimodal, que envolveria linhas de modos de mais alta capacidade como trem e metrô. O modo ônibus possui flexibilidade de seus itinerários poderem ser modificados e melhorados com maior facilidade por não dependerem de uma infraestrutura física construída à parte. Assim, a aplicabilidade da metodologia proposta nesta tese possui maior abrangência prática. De toda forma, as metodologias apresentadas também podem vir a serem adaptadas para projetar linhas de modos baseados em trilhos.

Trata-se de um problema ainda não abordado na literatura científica, onde, até o presente, são encontrados apenas problemas de projeto de redes mais simples de serviços de ônibus convencionais, e de tamanho e amplitude geográfica inferior às encontradas em metrópoles. Principalmente em países em desenvolvimento, em virtude da escassez de recursos para a construção de sistemas metroviários ou ferroviários, têm sido construídos sistemas de corredores de ônibus tronco-alimentados, empregando-se BRTs (do inglês “*bus rapid transit*”) (DENG; NELSON, 2011; CERVERO; DAI, 2014). Esses sistemas exigem projetos de redes estruturais que façam o melhor aproveitamento da infraestrutura construída.

A decisão de projetar uma rede nova pode ocorrer caso haja a vontade, intenção ou necessidade de reavaliação da rede de transporte de uma região e sua substituição por um novo conjunto de serviços. O projeto de uma nova rede de transporte público para uma área urbana é então necessário quando há a vontade de se implementar linhas para atender a uma demanda por transporte que não está sendo atendida de forma satisfatória face a valores e objetivos definidos em planos de transporte em vigor. Esta decisão cabe a gestores de uma cidade que buscam promover ações como: uma mobilidade urbana mais democrática com serviços

públicos de transporte, promoção de mais acesso a oportunidades de emprego aos residentes e redução dos problemas e externalidades geradas por meios motorizados individuais de locomoção, como poluição do ar e acidentes.

Diversas cidades no mundo já tiveram essa iniciativa, passaram ou estão passando pelo processo de modificar significativamente sua rede de transporte público, por exemplo: Santiago, com a implementação do sistema Transantiago (JIRÓN, 2012); Houston, que substituiu todas as linhas de ônibus por novas em 2015 (NACTO, 2019); São Paulo, com a implantação do sistema Interligado entre 2001-2004, da ‘Rede da Madrugada’, em 2015, e atualmente com a implantação de uma nova rede já licitada a partir de setembro de 2020, envolvendo modificação em centenas de linhas durante 3 anos; Barcelona, com a implantação da Nova Xarxa (TMB, 2019a); Seul, com a construção de vias de BRT e implementação de novas linhas troncais como parte de um grande projeto de melhoria do transporte público, em 2004 (ALLEN, 2013) e Dublin, que segue um processo de reprojeto de toda sua rede para implementação nos próximos anos (IRELAND, 2019). Nesse sentido, o objeto de estudo desta pesquisa tem relevância prática e corrente para impactar diretamente na vida dos cidadãos de áreas urbanas em todo o mundo.

O projeto de uma rede nova pode ser também aplicado para diferentes períodos, como a rede que opera ao longo dos dias úteis da semana, nas madrugadas e aos finais de semana. O atendimento a demanda de transportes no período da madrugada em São Paulo é um exemplo. Em 2015, a cidade removeu todo o limitado sistema que operava na madrugada e substituiu por novas linhas a partir de um projeto de uma rede exclusiva e nova para melhorar o atendimento da demanda neste período. Este projeto é o foco do estudo de caso desta pesquisa.

Uma outra possibilidade de pesquisa, que não o foco desta tese, é de modificação parcial de uma rede atual para melhorias. A modificação parcial de uma rede de transporte é um problema que requer a incorporação de linhas já existentes na avaliação do conjunto de linhas proposta pelo método de solução.

Dada a importância da estimação da demanda a ser atendida, esta pesquisa trata o problema de projeto de redes estruturais otimizadas de transporte público urbano por ônibus a partir de dados de bilhetagem eletrônica. Esses dados, conjuntamente com os registros de localização emitidos pela frota de ônibus, permitem estimar as viagens a serem atendidas pela rede a ser projetada, com um nível de resolução temporal mais elevado que pesquisas de coleta de campo tradicionais. Este uso traz desafios metodológicos e possibilidades de avaliação da

qualidade e robustez da nova rede para atender diferentes padrões de demanda em virtude do seu detalhamento temporal para diferentes dias da semana e dos meses do ano.

1.2 Objetivo da Pesquisa

Tendo em vista o exposto anteriormente, o objetivo principal desta pesquisa é desenvolver uma metodologia para o problema do projeto de redes estruturais de transporte público por ônibus em uma área urbana. Para seu desenvolvimento, no entanto, é necessária a definição da demanda de viagens a ser atendida pela rede e uma avaliação de sua viabilidade e robustez. Como objetivos específicos, busca-se:

- (i) Pesquisar métodos para estimar a demanda atual a ser atendida pela rede que se pretende projetar. Para isso são processados dados da operação atual de bilhetagem eletrônica e registros de posicionamento da frota para a estimativa da matriz origem-destino de viagens;
- (ii) Propor e desenvolver um método efetivo de otimização da rede estrutural de transporte público por ônibus a partir da demanda estimada;
- (iii) Aplicar a metodologia proposta a um estudo de caso de projeto de rede estrutural de transporte público por ônibus para as linhas da madrugada que operam na cidade de São Paulo/SP e sua avaliação frente à solução atualmente em operação;
- (iv) Avaliar a robustez das redes projetadas através da metodologia proposta frente a diferentes dados de entrada do projeto da rede, número de terminais operantes e cenários de demanda de diferentes dias estimados com base no processamento de dados de bilhetagem eletrônica.

Esta pesquisa é uma continuidade da dissertação de mestrado do autor (ARBEX, 2014), que resultou em uma publicação Arbex e Cunha (2015) versando sobre o projeto de redes otimizadas de transporte público por ônibus utilizando Algoritmos Genéticos. Na presente tese, busca-se desenvolver uma metodologia que consiga projetar redes otimizadas em uma escala maior à feita no estudo de caso de Arbex e Cunha (2015), visando fundamentalmente a aplicabilidade a cidades médias e grandes.

1.3 Relevância do Tema

O aumento expressivo do uso de veículos particulares para o transporte urbano diário nas grandes cidades tem trazido diversos problemas, como constantes congestionamentos, emissões de gases de efeito estufa e acidentes, principalmente em cidades de países em desenvolvimento (ANTP, 2017). Essas externalidades geradas, incluindo a expansão urbana descontrolada, geram efeitos sobre a qualidade de vida, o consumo de energia e a eficiência da cidade (ANTP, 1999; MACIEL, 2012).

Nos últimos anos houve um crescimento muito expressivo da frota de veículos no Brasil. Estimulada por um período de elevação de renda e de redução de impostos sobre carros populares, a motorização da população brasileira aumentou. A frota total de 101,1 milhões de veículos no Brasil em janeiro de 2019 representa 221,3% do que era a frota brasileira em igual período de 2007 (DENATRAN, 2019). Isto é, mais que dobrou em apenas 12 anos.

O aumento do uso de veículos privados gera mais congestionamentos, que por sua vez aumentam os tempos de viagem do sistema de transporte público por ônibus, tornando-o mais ineficiente. Esta ineficiência, por sua vez, gera uma maior demanda pela posse e uso de automóveis nos deslocamentos urbanos diários, por ser uma opção que oferece muitas vezes menores tempos de viagem e um maior conforto aos usuários. Esse ciclo vicioso de ineficiência no sistema tende a desestimular o uso do transporte público (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Neste cenário, a melhoria da qualidade do transporte público por ônibus é uma das soluções viáveis para a redução e mitigação desses problemas. Para tal, o sistema de transporte público por ônibus precisa oferecer atributos com alta qualidade de forma que ele seja atrativo à população. Dentre esses atributos, destacamos frequência de atendimento, tempo de viagem, lotação (conforto), confiabilidade, sistemas de informações e conectividade (FERRAZ; TORRES, 2004). Barreiras para o uso do transporte público relatadas por usuários de transporte individual de fato incluem longos tempos de viagem, lotação, baixa qualidade da informação disponível aos usuários, falta de confiabilidade e de transporte direto entre suas origens e destinos (BEIRÃO; SARSFIELD CABRAL, 2007).

Muitas agências públicas de transporte estão gerindo redes que não foram reavaliadas entre 20 a 50 anos (BAGLOEE; CEDER, 2011). Esta estagnação no planejamento traz uma defasagem no desenho da rede, que passa a não atender mais as demandas que surgem com a expansão e transformação urbana que ocorre continuamente nas cidades. Portanto, planejar as

linhas de transporte público em conjunto traz um grande potencial de economia de tempo de viagem para os usuários e redução dos recursos necessários à operação.

Além disso, com o surgimento e implantação da bilhetagem eletrônica, os sistemas de transporte público estão registrando os padrões de uso dos serviços com uma elevada desagregação ao nível do usuário, trazendo a possibilidade de análise destas informações para uma estimativa mais fidedigna da distribuição espaço-temporal das origens e destinos. A coleta contínua também possibilita obter a variabilidade da demanda ao longo dos dias do ano, que não era possível através dos métodos tradicionais como pesquisas por entrevistas domiciliares ou de sobe-desce em linhas.

Segundo Vuchic (2005), os sistemas de transporte público incluem inúmeras oportunidades de aplicação de estudos de pesquisa operacional e modelagem, incluindo o projeto de redes. O autor aponta que, embora exista um potencial de aplicações, muitos esforços nesse sentido são subutilizados em função do *gap* que existe entre a indústria de transportes e estudiosos teóricos. Este trabalho busca promover a divulgação de uma metodologia de otimização para projetos de rede que se aproxime da realidade da disponibilidade de dados existentes, das restrições de recursos presentes atualmente no setor e da complexidade intrínseca a redes de transporte de cidades médias e grandes.

1.4 Metodologia Utilizada

Considerando a natureza desagregada das origens e destinos das viagens no espaço urbano, para o projeto de redes estruturais de transporte público por ônibus será aplicada uma metodologia de estimativa de matriz de origem-destino (OD) de viagens a partir de registros de bilhetagem eletrônica de forma a trazer uma alternativa frente às custosas pesquisas tradicionais em campo.

O problema de projeto de redes de transporte público (PRTP) é um problema NP-difícil (CHAKROBORTY, 2003). Isso implica que não existem algoritmos eficientes para a solução de problemas de PRTP com o tamanho do problema encontrado na prática, principalmente em grandes cidades. Desta forma, pelo fato do problema apresentar uma complexidade combinatória elevada, neste trabalho é proposto um método de solução com meta-heurísticas para se encontrar a solução mais próxima da ótima possível.

Além disso, o fato de o problema exigir a minimização de ambos os custos dos usuários e dos operadores o torna multiobjetivo, exigindo uma abordagem adequada para encontrar as

soluções mais balanceadas entre estes dois objetivos na metodologia. A consideração de dois objetivos por si só é uma simplificação, já que também busca-se minimizar o número de transferências necessárias e maximizar o atendimento da demanda servido pelas linhas estruturais.

A primeira etapa metodológica do trabalho é o cálculo da matriz de origem e destino (OD) de viagens a serem atendidas para servir como dado de entrada do problema. Normalmente, conforme será apresentado no capítulo correspondente à revisão da literatura, os trabalhos de P RTP partem de uma matriz OD já fornecida, seja originada por pesquisa ou de uma instância artificial do problema. Para projetos de rede de transporte de grande escala de problemas práticos, é necessária a determinação de matrizes OD tão próximas quanto possível da demanda de viagens real da população. Assim, serão utilizados métodos de estimativa de matrizes OD através da análise de dados gerados automaticamente pelos sistemas de transporte público modernos: dados sobre o sistema de transporte, com as linhas, frequências e viagens atuais; dados de bilhetagem eletrônica; e dados de monitoramento da localização da frota por meio de dispositivos de GPS (*global positioning system*).

Na segunda etapa, são definidas as linhas estruturais da rede. Conforme discutido adiante no trabalho, parte-se da existência de uma infraestrutura física de terminais pré-existentes voltada à operação de uma rede de transporte público por ônibus do tipo tronco-alimentada (ou no termo em inglês *trunk-feeder*). Nesta estrutura, linhas estruturais operam com veículos maiores, com alta frequência de operação, conectando terminais de transporte localizados em diversas regiões da cidade. Preferencialmente devem utilizar um viário com tratamento preferencial para o transporte coletivo, como corredores e faixas exclusivas. Nos terminais, linhas locais oferecem o atendimento regional, assim como distribuem a demanda concentrada neste terminal nos bairros atendidos por ele. São operadas por veículos menores e dão maior acessibilidade aos bairros. A rede é a operação conjunta dos dois serviços para atender a demanda de viagens. A metodologia proposta neste trabalho trata do projeto de uma nova rede estrutural, sendo que as linhas locais consideradas já existentes não são consideradas para revisão.

A utilização das linhas locais já existentes decorre de alguns fatores. Em primeiro lugar, pela necessidade de simplificação da escala do problema. A inclusão da necessidade de projetar o sistema de linhas locais agregaria uma complexidade muito maior ao projeto da rede. Em segundo lugar, entende-se que linhas locais são mais simples, ligam um bairro ou região a um terminal, não havendo tantas alternativas de sua configuração. Em terceiro lugar, linhas locais

são definidas por um conjunto de planejadores com maior conhecimento das solicitações e reivindicações de cada bairro, sendo a modificação de seus itinerários de maior dificuldade.

A definição do itinerário e das frequências das linhas estruturais será dividida em quatro níveis de agregação da demanda e do sistema viário. Inicialmente, monta-se um grafo que represente o sistema viário onde é permitida a circulação de linhas estruturais (rede viária estrutural). Então, no primeiro nível, serão definidos tanto o número de linhas quanto os terminais que cada linha atende; no segundo, quais são os itinerários entre as paradas nos terminais de todas as linhas e é calculada uma estimativa de número de ligações diretas, sem transferências; no terceiro, são calculadas as frequências de operação das linhas, a frota necessária para operação da rede e o custo generalizado médio das viagens; no quarto, é feita uma avaliação conjunta da rede estrutural projetada com as linhas locais já existentes, de forma a verificar o comportamento global de todo o sistema de transporte com as linhas estruturais propostas. As linhas e os itinerários são selecionados dentre um conjunto criteriosamente construído de possibilidades através da meta-heurística Algoritmos Genéticos tanto nos primeiro e segundo níveis, considerando a natureza multiobjetivo do problema.

1.5 Delineamento do Trabalho

Esta tese de doutorado está organizada em capítulos, cujos conteúdos são resumidamente apresentados a seguir:

1. Introdução: contém a delimitação do objetivo da pesquisa, apresentação da relevância do tema, um breve resumo da metodologia e a visão geral da tese.

2. Panorama do Problema de Projeto de Redes de Transporte Público: apresenta uma conceituação e contextualização do problema, incluindo a descrição dos problemas correlatos, nomenclaturas adotadas na literatura e uma definição de termos. Também é discutida a inserção do problema no processo de planejamento estratégico de transportes urbanos.

3. Revisão da literatura: corresponde à revisão bibliográfica da literatura sobre o projeto de redes de transporte público. Neste capítulo são discutidas as etapas para solução do problema separadamente, incluindo dados de entrada, funções objetivo, restrições, variáveis de decisão e métodos de solução.

4. Caracterização do problema: contém a modelagem matemática do problema de projeto de rede de transporte público, contendo o modelo matemático, e as funções objetivo,

restrições e variáveis de decisão, assim como detalhamento das considerações adotadas para reduzir a complexidade do problema a níveis tratáveis computacionalmente.

5. Método de solução: é apresentado detalhadamente o método de solução proposto, iniciando pela elaboração da matriz OD a partir de bilhetagem eletrônica, para o projeto da rede estrutural e a avaliação conjunta das redes estrutural e local.

6. Experimentos computacionais: apresenta os experimentos computacionais do estudo de caso para a rede de ônibus da madrugada da cidade de São Paulo com as análises de sensibilidade realizadas com relação aos parâmetros de entrada do método, número de terminais diferentes e avaliação da robustez das redes com relação ao atendimento de demandas diferentes ao longo de uma semana.

7. Considerações finais: são apresentadas as conclusões e considerações finais, assim como um encaminhamento de propostas para trabalhos futuros.

2 CONCEITOS E TERMOS

Este capítulo tem o objetivo de apresentar conceitos e termos do problema do projeto de redes de transporte público de modo a preparar o leitor para os capítulos seguintes, tendo em vista a sua utilização no âmbito do presente trabalho.

- Matriz de Origens e Destinos de Viagens (Demanda):

A matriz de origens e destinos de viagens de transporte público (denominada matriz OD) parte do pressuposto que a demanda está agregada em zonas de tráfego, normalmente utilizadas em coletas de dados de transportes para subsidiar estudos estratégicos. A matriz OD contém, de cada zona de origem, a quantidade de passageiros que desejam viajar, em um dado período, a cada uma das zonas de destino para a realização de atividades.

Na verdade, as viagens são iniciadas em pontos específicos do espaço, seja a residência ou o local de trabalho dos usuários, por exemplo. Entretanto, devido à grande quantidade de pontos distintos de origens e destinos, é necessário fazer uma agregação destes locais para que o problema de projetar redes seja computacionalmente tratável. Neste trabalho são utilizados métodos de agregação que levam em consideração a agregação da demanda que utiliza pontos de ônibus de uma região, conforme será detalhado no Capítulo 5.

- Ponto de Parada:

Iniciada a viagem, após um tempo de caminhada do local de origem, o usuário chega no ponto de parada, que é o local físico onde ocorre o acesso e o egresso ao sistema de transporte público. Para o sistema de ônibus, consiste em uma área integrada à calçada pública com possíveis amenidades para o passageiro como bancos, informação impressa sobre as linhas e painéis de mensagem variável com tempos previstos de chegada dos veículos (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). Podem ser indicados por totens ou pequenos postes instalados nas calçadas das vias ou por instalações maiores com abrigo, a exemplo da Figura 2.1. Para os corredores exclusivos de ônibus são feitas estações com maior capacidade de volume de passageiros. O acesso e o egresso ao sistema também podem ocorrer nos pontos de parada das linhas em terminais de transporte.

Figura 2.1: Foto de um ponto de parada em Chicago, EUA.

Fonte: Próprio autor.

- Terminais:

Nas metrópoles brasileiras e em diversas cidades do mundo vêm sendo construídos terminais de transporte com uma estrutura física dedicada a abrigar os pontos de parada de início e término das linhas em maior quantidade. A Figura 2.2 ilustra o Terminal Santo Amaro, em São Paulo.

O *Transit Capacity and Quality of Service Manual 3rd Edition* faz referência aos terminais de transporte público como Transit Centers (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013): equipamentos para onde múltiplas rotas de ônibus convergem, oferecendo oportunidade de transferência entre as rotas e, muitas vezes, uma área de manobra para as rotas que terminam nesta instalação. O documento complementa que o termo também pode ser usado para estações intermodais que oferecem transferência entre linhas locais e outros modos. Algumas características dos terminais de transporte público (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013):

Figura 2.2: Terminal Santo Amaro em São Paulo.

Fonte: Wikipedia.

- Uma boa informação de orientação é essencial para os passageiros encontrarem o caminho para a sua conexão de transferência, e também devem considerar as necessidades das pessoas com deficiência;
- Amenidades além daquelas que podem ser encontradas em uma parada de ônibus podem incluir um abrigo maior ou mais elaborado, áreas de espera climatizadas, venda de ingressos, mapas das linhas e do entorno, estacionamento seguro para bicicletas, pontos de táxi, banheiros e uma área de embarque e desembarque de passageiros para veículos particulares;
- Recursos de segurança adicionais podem incluir vigilância por vídeo ou pessoal de segurança no local ou policiamento. Frequentemente incluem o fornecimento de uma sala de descanso ao motorista e banheiros.

Estes terminais trazem benefícios como: organizar o embarque e desembarque de passageiros em áreas de grande demanda, melhorando o uso do sistema viário no entorno; facilitar a integração entre linhas ao oferecer uma infraestrutura aos usuários durante as transferências, como abrigo de intempéries; e também permite a intermodalidade com sistemas de trilhos de forma mais controlada.

Os terminais de ônibus urbanos também estão relacionados à adoção de uma estrutura de rede de transporte público chamada de tronco-alimentada, onde um conjunto de linhas com veículos de menor tamanho provenientes de bairros mais afastados se destina a terminais. Esses terminais por sua vez possuem linhas de ônibus ou de transporte sobre trilhos (que podem ser desde bondes até linhas de metrô ou trem metropolitano) operando com veículos de maior capacidade para permitir a continuidade da viagem às áreas centrais e aos destinos finais dos usuários.

A adoção dessa configuração traz a necessidade intrínseca da realização de maior quantidade de transferências pelos usuários, gerando inconveniente/desconforto adicionais devido ao tempo e esforço despendidos na transferência.

- Rotas e Linhas:

O conceito de uma rota, também chamada de linha, é um serviço de transporte oferecido no sistema com uma frequência associada. Uma rota (ou linha) é composta de dois serviços de transporte que se complementam, um de ida e outro de volta para atender ambos os sentidos de movimento. Os termos “rota” ou “linha” são usados indistintamente nesta pesquisa. Cada serviço possui um local específico de início e fim e segue um trajeto (ou traçado ou itinerário) no sistema viário, atendendo a uma sequência pré-estabelecida de pontos de parada (Muñoz e Giesen, 2011).

Os veículos que operam o serviço também estão sujeitos a um limite de capacidade. Isto faz com que o carregamento das linhas, ou seja, a quantidade de passageiros que a utilizam em um intervalo de tempo, seja limitada a esta capacidade multiplicada pelo número de viagens que esta linha realiza neste intervalo (frequência). Quanto maior a quantidade de passageiros em um trecho da linha, maior a sua lotação, implicando que seus níveis de serviço decaem com o aumento de sua utilização (Muñoz e Giesen, 2011).

- Rede de Transporte Público:

O conjunto de rotas que operam no sistema de transporte público percorrendo um sistema viário constitui uma rede. O projeto da rede, denominado “*network design*” na literatura, é a definição deste conjunto de rotas com suas frequências associadas. Uma rede de transporte público deve oferecer aos seus usuários baixos tempos de viagem totais, incluindo baixos tempos de caminhada das origens até os pontos de parada, baixos tempos de espera médios, baixos tempos de viagem no veículo, um número tão reduzido quando possível de transferências necessárias entre linhas e uma lotação máxima que promova conforto adequado aos usuários.

Na Figura 2.3 estão representadas visualmente quatro tipos de redes de transporte público: a radial, a híbrida, a *hub-and-spoke* e a em forma de *grid* (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). A rede de uma região costuma começar com um desenho radial mas evolui ao longo de muitos anos em outras formas conforme ocorre o crescimento da região (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). As configurações de redes são detalhadas e exemplificadas a seguir.

Figura 2.3: Tipos de rede de transporte público.

Fonte: *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013).

- *Radial*: onde as linhas convergem para uma área central, devido ao seu papel como um grande atrator de viagens no pico da manhã (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). Este tipo de configuração de rede é mais comum em cidades pequenas, onde a demanda de viagens se concentra dos bairros para o centro. A Figura 2.4 apresenta o mapa das linhas de transporte público da cidade Oxford, Inglaterra, que possui este tipo de configuração.

Figura 2.4: Rede de transporte público por ônibus de Oxford, Inglaterra.

Fonte: *Oxford Bus Company* (2019).

- *Híbrida*: rede que contém linhas adicionais à estrutura puramente radial, passando a conectar diretamente origens e destinos fora do centro ao mesmo tempo que oferece conexões para rotas radiais (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). Tem uso em cidades que possuem demanda de viagens entre bairros diretamente, em virtude do crescimento de polos regionais de empregos. A Figura 2.5 mostra um destaque da rede de transporte de Auckland, Nova Zelândia, ilustrando uma rede de transporte do tipo híbrida, com ligações adicionais além das linhas radiais.

Figura 2.5: Mapa parcial da rede de transporte público por ônibus de Auckland, Nova Zelândia.

Fonte: Auckland Transport (2019).

- *Hub-and-spoke (Tronco-alimentada)*: esta configuração de rede, conhecida como tronco-alimentada, possui linhas estruturais de maior capacidade que conectam terminais de ônibus ao centro da cidade e entre eles (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). Linhas locais são responsáveis pelo trecho da viagem dos bairros mais distantes aos terminais. Sua adoção é potencializada pela construção de uma infraestrutura composta por terminais e um sistema viário com prioridade ao ônibus. Como exemplos, a Figura 2.6 apresenta um mapa conceitual do sistema tronco-alimentado de Seul e a Figura 2.7 apresenta o mapa do sistema Transmilenio, de Bogotá.
- *Grid*: esta configuração de rede é composta por uma série de linhas Norte-Sul que cruzam linhas no sentido Leste-Oeste (linhas paralelas e perpendiculares). Muitas viagens requerem uma transferência, mas os tempos de transferências são minimizados em função de uma alta frequência dos serviços (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013). Esta configuração de rede é utilizada na cidade de Barcelona, Espanha, conforme mapa apresentado na Figura 2.8.

Ônibus azuis (Linha Troncal) conecta áreas de subúrbio, o centro da cidade e sub-centros

Ônibus verdes (Linha Alimentadora) auxilia na conexão entre ônibus e sistemas de trilhos dentro da área

Figura 2.6: Mapa conceitual do sistema tronco-alimentado de Seul.

Fonte: Traduzido de The Korea Transport Institute (2015).

Figura 2.7: Mapa do sistema Transmilenio, indicando linhas estruturais troncais em vermelho, azul e amarelo, e linhas alimentadoras locais em cinza.

Fonte: Cervero e Dai (2014).

Figura 2.8: Rede em *grid* de Barcelona.

Fonte: Transportes Metropolitans de Barcelona TMB, (2019b).

- Transferência:

A transferência (também conhecido como transbordo ou integração) é o processo de troca entre dois serviços de transporte público (VUCHIC, 2007) para a realização de viagens onde não é possível partir do ponto de parada de origem e chegar ao ponto de parada do destino utilizando uma única linha. Nesse caso é necessário que o usuário desça em um ponto intermediário de um primeiro serviço e embarque em outro que o levará ao destino (ou que o levará a outro ponto de transferência). As transferências são penosas aos usuários tanto em termos de tempo como em termos de conforto (Wardman, 2004). É necessária uma ou mais etapas de caminhada, espera e embarque. Um dos atributos de um bom projeto de redes de transporte público é a minimização das transferências necessárias na rede.

- Frequência:

A frequência corresponde ao número de viagens ou partidas das linhas em um intervalo de tempo, normalmente uma hora. Dividindo este período de tempo pela frequência (viagens por unidade de tempo), temos o intervalo de uma linha, normalmente utilizado em minutos, que é o tempo entre duas partidas subsequentes. Uma alta frequência é importante para que sejam

oferecidos tempos de espera reduzidos para os usuários. Entretanto, uma maior frequência eleva a necessidade de veículos operando o serviço, aumentando os custos.

- Carregamento:

O carregamento é a quantidade de usuários que percorrem um trecho de uma linha (entre dois pontos de parada) ou um trecho da rede (correspondentes aos usuários de todas as linhas que operam em um segmento viário) em um intervalo de tempo (VUCHIC, 2005). Associado ao carregamento está o conceito de lotação, que, de acordo com o *Transit Capacity and Quality of Service Manual* (KITTELSON & ASSOCIATES, 2013), é a quantidade de passageiros transportados por área útil, ou também pode ser expresso por um fator conhecido como taxa de lotação (*load factor*) que é definida como a quantidade de passageiros transportados naquele trecho por assento do veículo. Estas medidas de lotação permitem a definição de níveis de serviço das linhas.

- Alocação:

Alocar a demanda de transporte significa distribuir as viagens às respectivas sub-redes de transporte envolvidas, tanto de transporte individual como de transporte público. A alocação da demanda de transporte público é a estimativa dos caminhos utilizados pelos usuários na rede para se deslocarem de suas origens aos seus destinos (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Ou seja, quais linhas (ou sequências de linhas) e pontos de parada que devem ser usadas para se chegar ao destino final para cada par OD da matriz de viagens. Como resultado da alocação, temos o carregamento final das linhas da rede, possibilitando a avaliação dos níveis de serviço, tempos de viagem dos usuários, o percentual de viagens diretas e com transferências, assim como a verificação da adequação ou não da oferta prevista com relação à capacidade.

Este é um subproblema complexo do projeto de redes de transporte público, consumindo tempo computacional considerável na avaliação das soluções. A alocação dificulta a modelagem e exige um tratamento detalhado (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011). Neste trabalho, será utilizado um procedimento simplificado de alocação para fornecer velocidade à busca computacional por melhores soluções, e, após selecionadas as soluções de interesse, estas serão representadas em um software de planejamento de transportes para resolver o subproblema da alocação utilizando métodos mais complexos e com implementações computacionais otimizadas.

- Demanda não-atendida:

No processo de alocação da demanda, pode ocorrer de pares OD não possuírem uma ligação direta possível na rede de transporte público resultante. Essas viagens precisam utilizar mais de uma linha para serem realizadas, ou mesmo podem requerer a realização de longas caminhadas para o acesso aos pontos de parada mais próximos ao início e destino final. Porém, devido ao fato das transferências serem penosas tanto em tempo como em desconforto adicional, uma viagem que precise de muitas transferências para ser concluída é considerada uma demanda não-atendida pela rede (GUIHAIRE; HAO, 2008). O indicador de percentual de demanda não-atendida deve ser minimizado num projeto de redes de transporte público.

- Custos dos Usuários e Custos dos Operadores:

A definição de custos utilizada nesta pesquisa considera que a rede a ser projetada precisa reduzir tanto os custos dos usuários como os custos dos operadores, constituindo um problema de otimização multiobjetivo (BAAJ; MAHMASSANI, 1991; ARBEX; DA CUNHA, 2015). Os custos dos operadores são representados pela quantidade e composição da frota a ser utilizada, assim como a quilometragem total percorrida pelos veículos e o período de horas que operam.

Já os custos dos usuários são calculados somando-se os custos generalizados de todas as viagens na rede; o custo generalizado de cada viagem é dado pela soma dos tempos de caminhada, tempos de espera e tempos de viagem, multiplicados por fatores de percepção. Estes fatores são incorporados ao cálculo para representar que o valor do tempo percebido pelo usuário é diferente nessas etapas da viagem (WARDMAN, 2004).

Como síntese deste capítulo, a Tabela 2.1 resume os diferentes termos apresentados e as respectivas referências que as definem. Na sequência, o Capítulo 3 corresponde à revisão da literatura sobre o problema de PRTP, descrevendo melhor as suas características, variáveis de decisão, restrições, funções objetivo e metodologias, instâncias e estudos de caso.

Tabela 2.1: Termos e referências indicados.

Termo	Referência
Modelo de 4 Etapas	Ortúzar e Willumsen (2011), p. 21
Processo de Planejamento de Transporte Público	Ceder e Wilson (1986)
Matriz Origem e Destino de Viagens	Ortúzar e Willumsen (2011), p. 175
Ponto de Parada	Kittelson & Associates <i>et al.</i> (2013), p. 10-5
Terminal	Kittelson & Associates <i>et al.</i> (2013), p. 10-6
Rota/Linha	Muñoz e Giesen (2011)
Rede de Transporte Público	Kittelson & Associates <i>et al.</i> (2013), p. 2-40
Frequência	Kittelson & Associates <i>et al.</i> (2013), p. 2-36
Alocação	Ortúzar e Willumsen (2011), p. 349
Transferência	Vuchic (2005), p.215 Vuchic (2007), Apêndice III
Demanda não-atendida	Guihaire e Hao (2008) p.1254
Carregamento	Vuchic (2005), p.6
Custos dos usuários e dos operadores	Baaj e Mahmassani (1991) Arbex e Cunha (2015)
<i>Transit Network Design Problem (TNDP)</i>	Guihaire e Hao (2008)
<i>Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFSP)</i>	Guihaire e Hao (2008)

3 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura relacionada ao projeto de redes de transporte público (PRTP). A estrutura do capítulo inicia com uma contextualização do problema e com a apresentação da nomenclatura dos problemas de PRTP. Após, apresenta-se uma visão geral do problema na literatura, em seguida é discutido como são tratadas as diversas características do PRTP, incluindo funções objetivo, restrições, variáveis de decisão, dados de entrada, métodos de solução e características das instâncias utilizadas nos estudos de caso. Parte da estruturação deste capítulo se baseia e corresponde a uma atualização das revisões apresentadas em Arbex (ARBEX, 2014) e Arbex e Cunha (2015). O capítulo finaliza com uma avaliação crítica da literatura, apresentando as oportunidades de pesquisa e as contribuições desta pesquisa ao tema.

3.1 Contextualização do Problema

Segundo Ortúzar e Willumsen (2011), a modelagem computacional aplicada ao planejamento estratégico futuro de transportes não resolve problemas de transporte por si só, seu papel é auxiliar a tomada de decisão em etapas chave do processo. No diagrama de tomada de decisão racional apresentado na Figura 3.1, o processo contínuo de planejamento de transporte se inicia com a formulação inicial do problema a ser resolvido, seguido de coleta de dados, construção e calibração de modelos analíticos. São geradas soluções alternativas, que, por sua vez, são testadas e avaliadas através do modelo, permitindo escolher a melhor para implantação (Ortúzar e Willumsen, 2011). Assim, segundo essa visão, não é papel dos modelos, mas sim do planejador de transporte, elaborar as soluções alternativas a serem avaliadas com o auxílio dos modelos.

O tradicional modelo de quatro etapas é normalmente utilizado nesse contexto de planejamento estratégico futuro, sendo composto de uma sequência de submodelos: geração de viagens, distribuição de viagens, divisão modal e alocação (Ortúzar e Willumsen, 2011). Com este modelo é possível estimar o carregamento e os níveis de serviço oferecidos tanto pelo sistema viário como pela rede de transporte público para uma projeção futura de demanda, de forma a auxiliar o dimensionamento e a avaliação de custo-benefício dos projetos avaliados.

Figura 3.1: Estrutura de tomada de decisão no processo de planejamento contínuo de transportes.

Fonte: Traduzido de Ortúzar e Willumsen (2011).

Entretanto, o modelo de quatro etapas não inclui a elaboração desses projetos a serem avaliados, ou seja, não gera as soluções a serem testadas. Esta etapa deve ser feita por planejadores de transporte e, por ser estratégica, deve ser feita otimizando os recursos e atendendo da melhor forma possível à demanda da população, já que sua modificação após feita a implantação é complexa. O modelo de quatro etapas tem sido utilizado para projeção de demanda futura e avaliação de alternativas, porém cabe ao planejador tal elaboração.

No contexto do transporte público, o projeto de rede é a primeira etapa do processo de planejamento operacional do transporte público, proposto originalmente por Ceder e Wilson (1986). Este processo contém as etapas: (i) Projeto de Rede; (ii) Definição das frequências das linhas; (iii) estabelecimento do quadro de horários; (iv) programação dos veículos e (v) programação dos motoristas. Como dados de entrada para a etapa de Projeto de Rede, Ceder e Wilson (1986) indicam dados de demanda e oferta, e, como resultados desta etapa, as rotas e estratégias operacionais a serem adotadas no sistema de transporte público.

Recentemente, Ibarra-Rojas *et al.* (2015) apresentaram a interação entre as etapas do processo de planejamento do transporte público, mostrando os parâmetros, problemas e

resultados de cada etapa, conforme Figura 3.2. Estas etapas são aquelas introduzidas por Ceder e Wilson (1986) com a incorporação da etapa de controle em tempo real usando dados gerados pelo sistema. Como dados de entrada para a etapa de projeto da rede de linhas, Ibarra-Rojas *et al.* (2015) apresenta: topologia e características da rede viária, estrutura de tarifas, restrições orçamentárias e características da demanda. Como resultados constam o conjunto de rotas, as transferências necessárias e os terminais a serem operados. Os autores também classificam essa etapa como estratégica no processo de planejamento do transporte público.

3.2 Nomenclatura dos Problemas de Projeto de Redes de Transporte Público

De acordo com Ceder e Wilson (1986), o processo de planejamento operacional do transporte público pode ser dividido em cinco etapas sequenciais sistemáticas: projeto das rotas, designação de frequências, desenvolvimento da tabela de horários, agendamento da frota e agendamento de motoristas. Nesse processo de planejamento operacional do transporte público, as duas primeiras etapas correspondem à projetar a rede em si: o projeto das rotas e a determinação das frequências de operação. A denominação dada ao problema pelos autores é *network route design*.

Como decisões feitas em etapas posteriores vão ter efeito em decisões de nível superior, todas as etapas deveriam ser planejadas simultaneamente para maximizar a produtividade e eficiência do sistema (CEDER, 2015). Entretanto, uma vez que cada etapa em si é um subproblema do tipo NP-difícil (GUIHAIRE; HAO, 2008), existe a dificuldade de considerar conjuntamente e isto requer então um tratamento separado para cada atividade (CEDER, 2015).

No tocante a essas etapas estratégicas e táticas de planejamento de transporte público, como projeto, definição de frequências e tabela horária de veículos, Guihaire e Hao (2008) apresentam uma revisão abrangente. Os autores destacam que são problemas multiobjetivo, já que objetivos financeiros também devem ser levados em conta. Guihaire e Hao (2008) propõem uma terminologia para as combinações dos subproblemas, conforme apresentado na Figura 3.3. Para o problema de projeto da rede, o termo TNDP (*transit network design problem*) é proposto. No caso do problema de projeto de rede solucionado conjuntamente com o de estabelecimento das frequências das linhas, o termo é TNDFSP (*transit network design and frequency setting problem*). Guihaire e Hao (2008) também apontam que solucionar o problema do projeto de rede juntamente com a definição de frequências melhora a qualidade da solução.

Figura 3.2: Interação entre as etapas do processo de planejamento do transporte público por ônibus.

Fonte: Traduzido de Ibarra-Rojas *et al.* (2015), adaptado de Ceder e Wilson (1986).

Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) fizeram uma revisão estruturada de abordagens ao problema sob o termo de TRNDP (*transit route network design problem*), dividindo em três camadas as abordagens de solução para organizarem a revisão: objetivos, parâmetros e metodologia.

Uma revisão da literatura de Farahani *et al.* (2013) trata das definições, classificações, objetivos, restrições, variáveis de decisão e metodologias do problema de projeto de redes urbanas de transporte (*urban transportation network design problem*, UTNDP), escopo que abrangeria tanto o projeto de redes viárias (*road network design problem*) e o projeto de redes de transporte público (*public transit network design problem*, ou PTNDP). Os autores

descrevem que a grande parte dos trabalhos de projeto de redes de transporte público tratam apenas de um modo, sem considerar interações que correm na realidade entre os múltiplos modos que estão presentes nas redes das cidades. Assim, os autores também propõem a nomenclatura para o problema correlato de projetar redes multimodais de transporte público (*multimodal network design problem*, ou MMNDP).

Figura 3.3: Classificação e Nomenclatura dos problemas de projetos de rede de transporte público.

Fonte: Traduzido de Guihaire e Hao (2008).

Ibarra-Rojas *et al.* (2015) apresentam uma revisão da literatura sobre esse conjunto de problemas correlatos, que os autores denominam simplesmente projeto de redes de transporte público (*transit network design*, ou TND). Na pesquisa de Ibarra-Rojas *et al.* (2015) é apresentado o projeto de redes de transporte público (PRTP, do inglês *transit network design*) como etapa que define o desenho das linhas, tipos de veículos e suas características operacionais, de forma a otimizar funções objetivo específicas como a minimização dos custos dos usuários e operadores. Nesta etapa está incluída uma definição preliminar das frequências das linhas a serem operadas que será detalhado posteriormente na etapa de determinação das frequências. Alguns estudos, entretanto, consideram apenas a definição do traçado das linhas, sem olhar a natureza multiobjetivo do problema.

Ibarra-Rojas *et al.* (2015) descrevem duas abordagens do problema do PRTP: uma denominada “aproximação contínua”, na qual onde são desenvolvidas relações entre componentes do transporte público representado por estruturas idealizadas. Nesta abordagem, busca-se determinar elementos como espaçamento das linhas, espaçamento entre os pontos de parada, frequência das linhas, geralmente assumindo uma estrutura de *grid*, como os trabalhos de Daganzo (2010), Estrada *et al.* (2011) e Badia (2014). A outra abordagem é a de “otimização

discreta”, onde as linhas são definidas uma a uma, que é o foco desta pesquisa e da maioria dos trabalhos de TND revisados por Ibarra-Rojas *et al.* (2015).

Embora métodos de solução têm sido desenvolvidos para os problemas de planejamento de sistemas de transporte por ônibus, Ibarra-Rojas *et al.* (2015) apresentam que ainda existem perguntas de pesquisa em aberto. Dentre elas, os autores mencionam a incerteza do planejamento de sistemas de transporte público no que diz respeito à demanda e aos tempos de viagem. Nos dias de hoje, a grande quantidade de dados que são gerados continuamente por esses sistemas, como GPS e bilhetagem eletrônica, permitem o desenvolvimento de um planejamento de transporte público mais robusto, que deve ser alvo de pesquisa futura (IBARRA-ROJAS *et al.*, 2015).

3.3 Visão Geral do Projeto de Redes de Transporte Público na Literatura

De acordo com Fan *et al.* (2009), planejadores de transporte público tradicionalmente desenvolvem redes de linhas de ônibus e tabelas de horários através de experiências e conhecimentos anteriores, diretrizes simples e demandas das comunidades locais. Algumas vezes, redes de transporte público apenas evoluem ao longo do tempo, com novas rotas sendo gradualmente adicionadas, assim como o aumento das frequências das rotas já existentes, de modo a atender à demanda crescente, sem que uma revisão ou reestruturação maior da rede seja feita para eliminar ineficiências e inconsistências.

O alto poder computacional disponível atualmente permite aos planejadores utilizarem ferramentas baseadas em computadores para fazer o projeto de grandes sistemas de transporte público, otimizando o uso dos recursos disponíveis. Muitas agências de transporte público estão utilizando redes que não foram revistas ou revisadas nas últimas décadas (Bagloee e Ceder, 2011). Nesse cenário, é viável considerar projetos de novas redes a fim de otimizar os recursos do sistema e atender melhor aos usuários.

Conforme já apresentado na seção anterior que descreve a nomenclatura dos problemas, revisões sobre o problema de PRTP podem ser encontradas em Guihaire e Hao (2008), Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) e em Ibarra-Rojas *et al.* (2015). Especificamente Guihaire e Hao (2008) identificaram e classificaram 69 estudos quanto ao problema que abordam. Conforme apresentado anteriormente na Figura 3.3, os autores propõem a classificação e nomenclatura separadamente para as etapas de projeto de rede (*transit network design problem*, TNDP) e projeto da rede com estabelecimento de frequências (*transit network design and*

frequency setting problem, TNDFSP). As seções seguintes deste capítulo apresentaram os artigos de acordo com esta classificação proposta.

Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) apresentaram uma revisão sistemática e abrangente sobre a pesquisa em projeto de redes de transporte público, baseadas em quatro aspectos distintos do problema: objetivos do projeto, parâmetros operacionais, restrições e métodos de solução. Os autores também apresentaram fluxogramas descrevendo típicas soluções heurísticas e características chave dos modelos.

É importante salientar que Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) dividem a literatura do PRTP em duas quanto à abordagem metodológica: aqueles trabalhos que consideram que a rede final é uma seleção de rotas a partir de um grande conjunto de rotas possíveis gerados por métodos heurísticos (rotas estáveis na busca; método de geração de rotas e configuração de rotas na rede), e aqueles que aplicam métodos de busca local e operadores específicos que criam e modificam as rotas da rede (rotas modificáveis ao longo da busca, método de melhoria de rotas).

Ibarra-Rojas *et al.* (2015) apresentaram diversas abordagens do tema do PRTP em uma revisão da literatura, incluindo abordagens com a utilização de meta-heurísticas, com considerações estocásticas para a demanda e também considerando o aspecto multiobjetivo do problema.

Para esta pesquisa foi realizado um levantamento dos trabalhos que tratam do problema de projeto de redes que podem incluir ou não o cálculo das frequências das linhas. Ao todo, 38 trabalhos foram selecionados e examinados. Um quadro resumo dos artigos revisados é apresentado no Quadro 3.1. Para evitar que este capítulo de revisão da literatura deste trabalho ficasse excessivamente longo, o detalhamento dessa revisão cronológica sobre os trabalhos apresentados no Quadro 3.1 é apresentado em separado, no APÊNDICE A. Esta revisão cronológica detalha cada trabalho individualmente quanto ao método utilizado e sua aplicação. Este capítulo, por sua vez, apresenta a revisão da literatura com base nas funções objetivo utilizadas, as principais restrições adotadas, as variáveis de decisão, os dados de entrada, métodos de solução e instâncias que foram utilizadas para aplicação do método.

Conforme apresentado no Quadro 3.1, observa-se na revisão da literatura que não existe uma padronização das funções objetivo nem mesmo das restrições adotadas. Este fato dificulta as comparações de qualidade dos resultados dos métodos entre os trabalhos.

Quanto aos métodos, predominam aqueles baseados em meta-heurísticas, com destaque para Algoritmos Genéticos, dada a natureza de elevada complexidade de otimização

combinatória intrínseca ao problema. Recentemente, estão sendo propostas na literatura novas meta-heurísticas para o PRTP, como Evolução Diferencial (TARAJÓ BUBA; SOON LEE, 2018), Procura de Feixe Estocástico (*Stochastic Beam Search Algorithm, SBS*) (ISLAM *et al.*, 2019) e Otimização de Enxame de Partículas Multiobjetivo com Várias Estratégias de Busca (*multi-objective particle swarm optimization with multiple search strategies, MMOPSO*) (JHA; JHA; TIWARI, 2019), com resultados competitivos para o benchmark da literatura de Mandl (1979), composto de 15 nós e 21 *links* viários, demonstrando o potencial de utilização de outros métodos de solução para este problema.

Com relação às instâncias, ou seja, representações simplificadas de sistemas viários das cidades para as quais se está projetando uma rede de transporte público, seu conjunto é pequeno e restrito. No PRTP, existe uma predominância de uso da rede de Mandl, originalmente apresentada por este autor em Mandl (1979). Outro fator a ser destacado é a não-disponibilização das instâncias de teste utilizadas pelos autores em domínios públicos. Embora outras redes tenham sido usadas na literatura, os autores, em sua maioria, não as divulgam com os artigos. Até a data de publicação desta pesquisa, é de conhecimento deste autor a existência poucas instâncias disponíveis para *download* na Internet: Mandl (1979) (1 instância), Mumford (2013) (4 instâncias), Rivera, Uruguai (MAUTTONE, 2005) (1 instância) e, recentemente, Nottingham (AHMED *et al.*, 2019).

Finalizada a visão geral, a seguir são discutidos cada um dos aspectos da modelagem do problema do PRTP utilizada na literatura. São descritas as funções objetivo, as restrições, as variáveis de decisão, os dados de entrada, os métodos de solução e as instâncias utilizadas, conforme destacado no Quadro 3.1. Uma análise crítica da revisão é feita ao final deste capítulo.

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
1967	Lampkin e Saalmans	Minimizar tempo total de viagem e custos dos operadores	Capacidade das rotas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico	Cidade pequena na Inglaterra	Definições do que seria uma boa rede
1979	Mandl	Minimizar tempo de viagem	Número de rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico	Região da Suíça de 15 nós e 21 <i>links</i>	Instância aplicada virou referência na literatura
1991	Baaj e Mahmassani	Minimização de custos dos operadores e usuários	Frequências, lotação	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico	Benchmark de Mandl	Melhoria de Rota
1995	Baaj e Mahmassani	Minimização de custos dos operadores e usuários	Viabilidade, frequência, extensão da rota	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico	Austin, Texas	Melhoria de Rota
1998	Ceder e Israeli	Minimizar: tempo de espera, Tempo de bancos vazios, Tempo médio de viagem e frota	Frequência	Rotas e Frequência	Localização de Terminais, Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico (<i>set covering</i>)	Não aplica	Descreve em um exemplo bem simples as funções objetivo
1998	Pattnaik <i>et al.</i>	Minimizar custo do usuário e custo do operador	Viabilidade, intervalo, lotação, frota	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Madras, Índia (25 nós e 39 <i>links</i>)	Geração e configuração de rotas
2002	Chakroborty e Dwivedi	Minimizar tempo total de viagem	Viabilidade	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Benchmark de Mandl	Operadores do genético modificam as rotas
2002	Carrese e Gori	Minimizar diferença de tempo no transporte público vs. menor caminho, tempo de espera e custo operacional	Satisfação da demanda, Extensão, Diretividade da Rota, Tempo de Viagem	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem, Rede Existente (Trilhos)	Heurístico	Roma, Itália	Trabalha com diversos modos utilizando um gráfico de relação entre volume e modo apropriado

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
2003	Ngamchei e Lovell	Minimizar custo da frota, custo dos usuários (espera e dentro do veículo)	Intervalo	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Rede própria de 25 nós	Diversos operadores que modificam as linhas
2003	Chakroborty	Minimizar tempo total de transferência e de espera	Frota, Capacidade, Frequência	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Benchmark de Mandl	Operadores do genético modificam as rotas
2003	Tom e Mohan	Minimizar soma de tempos de viagem e quilometragem total dos veículos	Frequência, Lotação	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Rede de Chennai, Índia, com 75 nós e 125 <i>links</i>	Geração e configuração de rotas
2005	Lee e Vuchic	Minimização de tempos de viagem e maximização do lucro do operador e benefício social	Viabilidade	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico	Rede própria de 16 nós	Gera muitas estatísticas sobre a rede. Trabalha com Demanda variável.
2006	Cipriani <i>et al.</i>	Minimizar soma ponderada de custos dos operadores e dos usuários	Extensão das Rotas, Frequências, Capacidade	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Bairro de Roma	Geração e configuração de rotas com melhoria da rede final
2009	Fan <i>et al.</i>	Minimizar tempo de viagem, transferências e extensão total das rotas	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico (Otimização multiobjetivo)	Benchmark de Mandl e Mumford	Procedimento de busca local que faz pequena mudança nas linhas
2010	Fan e Mumford	Minimizar tempo de viagem e transferências	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico (<i>Hill Climbing e Simulated Annealing</i>)	Benchmark de Mandl	Foca na representação, inicialização e movimentos de vizinhança
2011	Szeto e Wu	Minimizar soma ponderada de número de transferências e tempo total de viagem	Frota, Extensão, Capacidade	Rotas, Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmo Genético)	Região de Hong Kong	Os operadores do genético atuam em parte da rota, aplicando modificação

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
2011	Blum e Mathew	Minimizar custos dos operadores e dos usuários	Frequência, Capacidade, Frota	Rotas, Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico (Agentes Inteligentes)	Benchmark de Mandl e Delhi, Índia	Multiobjetivo com Fronteira de Pareto. Agentes de criação e modificação da rede
2011	Bagloee e Ceder	Minimizar tempo generalizado de viagem	Frota, Capacidade	Modos, Tipo de Rotas, Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmo Genético e Colônia de Formigas)	Benchmark de Mandl e Chicago, EUA	Clusterização de pontos, diferentes modos, geração e configuração de rotas
2012	Cipriani <i>et al.</i>	Minimizar custos dos operadores e dos usuários e demanda não atendida	Extensão das Rotas, Frequências	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem, Rede Existente	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Roma, Itália	Geração e configuração de rotas; Alocação no EMME
2013	Nikolić e Teodorović	Minimizar tempo de viagem, transferências	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Colônia de Abelhas)	Benchmark de Mandl	Melhoria de Rota
2013	Afandizadeh <i>et al.</i>	Minimizar custos dos operadores e dos usuários	Número de rotas, lotação, extensão	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmo Genético)	Benchmark de Mandl	Usa <i>Logit</i> na alocação
2013	Mumford	Minimizar tempo de viagem, transferências e extensão total das rotas	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos) com operadores	Benchmark de Mandl e Mumford	Operadores de reparo
2013	Chew <i>et al.</i>	Minimizar tempo de viagem, transferências e extensão total das rotas	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Benchmark de Mandl	Os operadores do genético atuam em parte da rota
2014	Kechagiopoulos e Beligiannis	Minimizar tempo de viagem	Viabilidade, Número de Rotas, Extensão	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Nuvem de Partículas)	Benchmark de Mandl	Melhoria de Rota

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
2014	Nayeem <i>et al.</i>	Minimizar número de transferências e tempo de viagem	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Benchmark de Mandl	Melhoria de Rota
2014	Szeto e Jiang	Minimização de transferências	Viabilidade, frequência, número de rotas, frota	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Colônia de Abelhas)	Região de Hong Kong e Winnipeg	Melhoria de Rota
2014	Nikolić e Teodorović	Minimizar: Tempo total de viagem, frota	Viabilidade, Capacidade, número de Rotas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Colônia de Abelhas)	Benchmark de Mandl	Melhoria de Rota
2014	Kiliç e Gök	Minimizar: tempo de espera, Tempo de bancos vazios, Tempo médio de viagem	Viabilidade	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (<i>Hill Climbing</i> , Busca Tabu)	Benchmark de Mandl e instâncias de Mumford	Melhoria de Rota
2015	Zhao <i>et al.</i>	Minimizar: custo total do usuário e penalidade do usuário	Intervalo, Extensão, Frota, Número de nós, Diretividade da rota, Número de Rotas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmo Memético)	Benchmark de Mandl	Operadores de busca local
2015	Arbex e Cunha	Minimizar: Tempo generalizado de viagem e Frota	Intervalo, Extensão, Frota, Número de nós, Diretividade da rota, Número de Rotas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos) com Busca Local	Benchmark de Mandl	Objetivo alternante; Geração e configuração de rotas

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
2015	Rahman <i>et al.</i>	Minimizar: Tempo total de viagem	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmo Genético Guiado com Elitismo (GGAW))	Benchmark de Mandl	Bons resultados na instância
2014 2015	Amiripour <i>et al.</i>	Minimizar: Tempo de espera, Tempo de bancos vazios, tempo adicional de viagem	Intervalo, Extensão, Número máximo de transfers, Frota	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem, Rede Existente	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Benchmark de Mandl e Mashhad, Irã	Permite Melhoria de Rota, usa rotas já existentes
2016	Buba e Lee	Minimizar: Tempo total de viagem	Viabilidade, Número de Rotas	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Evolução Diferencial)	Benchmark de Mandl	Trabalha com Melhoria de Rota
2018	Owais e Osman	Minimizar: tempo médio de viagem e frota total	Extensão, Lotação, Frota, Percentual Mínimo de viagens diretas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede e Tempos de Viagem	Heurístico/Meta-heurística (Algoritmos Genéticos)	Mandl e Rivera	Inclui etapa de alocação com cálculo de frequências
2018	Buba e Lee	Minimizar: tempo total de viagem e demanda não-atendida	Extensão, intervalo, lotação, frota, número de linhas	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede, Tempos de Viagem e Parâmetros	Meta-heurística (Evolução Diferencial: <i>Differential Evolution</i>)	Mandl	Número de rotas fixo
2019	Ahmed <i>et al.</i>	Minimizar tempo de viagem e extensão total das rotas	Viabilidade, número de nós, conectividade da rede	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede, Tempos de Viagem	Hiper-heurísticas	Mandl e Mumford	Usa sete heurísticas de modificação de linhas
2019	Islam <i>et al.</i>	Maximizar demanda atendida; minimizar tempo total de viagem e número de transferências	Viabilidade da Rede	Rotas	Matriz de Demanda, Grafo da Rede, Tempos de Viagem	Meta-heurístico: HEU-SBS (<i>Stochastic Beam Search Algorithm</i>)	Mandl e Dhaka	Trabalha com operadores de mudança de Rota

Quadro 3.1: Resumo da revisão cronológica da literatura

Ano	Autores	Função Objetivo	Restrições	Variáveis de Decisão	Dados de Entrada	Método de Solução	Instâncias	Observações (método)
2019	Jha <i>et al.</i>	Minimizar custo generalizado dos usuários, frota total e emissões	Conectividade da rede, nós únicos nas rotas, número de linhas, frequências, extensão, frota total, emissões	Rotas e Frequência	Matriz de Demanda, Grafo da Rede, Tempos de Viagem	Meta-heurístico: MMOPSO (<i>Multi-objective particle swarm optimization with multiple search strategies</i>)	Mandl	Utiliza conjunto de rotas pré-gerado e utiliza fronteira de Pareto para apresentar resultados

Fonte: Próprio autor.

3.4 Funções Objetivo

As funções objetivo do problema de projeto de rede de transporte público se baseiam nos indicadores de uma rede de transporte público eficiente. Conforme apontado em Chakroborty e Dwivedi (2002), supõe-se que uma rede eficiente deve possuir as seguintes propriedades:

- a) a rede deve satisfazer a maior parte, se não toda, demanda existente;
- b) a rede deve satisfazer a maior parte da demanda sem exigir que seus passageiros façam transferências entre uma rota e outra e
- c) a rede deve oferecer baixos tempos totais de viagem aos passageiros.

Além disso, a operação da rede de transporte público deve custar o menos possível, constituindo um problema multiobjetivo. Cabe ressaltar que a não inclusão da etapa de definição das frequências das linhas limita a qualidade da estimativa dos custos dos operadores, já que parte dos custos operacionais advém da frota necessária para operação da rede, que só pode ser calculada com a definição das frequências para todas as linhas.

Embora as funções objetivo utilizadas pelos diferentes autores na literatura não sejam exatamente as mesmas, estas vêm convergindo para a minimização tanto do custo total dos usuários e a minimização dos custos dos operadores. A seguir são relacionadas as funções objetivo utilizadas em trabalhos recentes que consideram esta natureza multiobjetivo do problema:

- Minimização do tempo total de espera dos usuários, da capacidade não-utilizada dos veículos, do excesso de tempo de viagem dos usuários frente ao caminho mais curto, da demanda não-atendida e da frota total (AMIRIPOUR; CEDER; MOHAYMANY, 2014b);
- Minimização do custo generalizado total dos usuários e minimização da frota em termos de número total de veículos (ARBEX; DA CUNHA, 2015);
- Minimização do tempo de viagem dentro do veículo dos usuários e Minimização da extensão total do conjunto de rotas (AHMED; MUMFORD; KHEIRI, 2018);
- Minimização do custo generalizado total dos usuários, demanda não-atendida, frota total e emissões de carbono (JHA; JHA; TIWARI, 2019).

A forma de abordar a questão multiobjetivo do problema é distinta na literatura. Parte dos trabalhos revisados adota o cálculo de uma única função objetivo através de uma soma

ponderada do tempo total de viagem e dos custos dos operadores, que deve ser minimizada, como em Amiripour *et al.* (2014). Essa minimização geraria uma maximização do benefício social (*welfare*) da rede. Entretanto, é difícil estimar os valores adequados dos pesos tanto devido à diferença de escala dos valores de ambos os custos como qual dos objetivos deve ser mais priorizado pela comunidade.

Dessa forma, são também utilizadas técnicas de otimização multiobjetivo para que sejam incorporadas duas funções objetivo sem a necessidade de estimativas de pesos. Nesse sentido, em Arbex e Cunha (2015) (estudo anterior do autor) foram adotadas duas funções objetivo separadamente (minimização do custo generalizado total dos usuários e da frota), obtendo ao final da aplicação do método uma fronteira de Pareto que posiciona as soluções quanto às duas funções objetivo adotadas.

A fronteira de Pareto é o conjunto de soluções no qual nenhum dos objetivos pode ser melhorado sem que pelo menos um dos demais seja prejudicado. Embora o uso do conceito da fronteira de Pareto para elencar soluções equilibradas esteja presente na literatura, não há um consenso sobre quais funções objetivo devem ser utilizadas: Jha *et al.* (2019) gera fronteira de Pareto de soluções com relação ao tempo de viagem dos usuários e custos dos operadores (frota e emissões), enquanto que Ahmed *et al.* (2018) considera tempos de viagem dos usuários e soma das extensões percorridas por todas as rotas, indicador simplificado pois seu método não calcula as frequências das linhas projetadas.

3.5 Restrições

O problema de projeto de redes de transporte público é geralmente modelado através de modelos matemáticos compostos de diversas restrições, fazendo com que as soluções válidas se encontrem em apenas uma pequena parte do espaço de soluções, que é muito grande. Estas restrições são necessárias para que a rede proposta seja viável de ser operada nas cidades.

De forma geral, são consideradas as mesmas restrições na maioria dos trabalhos pesquisados, com pequenas variações entre eles. Nesta seção, são descritas e detalhadas as restrições que são consideradas no PRTP. As restrições são as resumidas a seguir, considerando três agrupamentos: restrições relativas às rotas, à rede e à sua viabilidade:

- Rotas:
  - Frequências e Intervalos
  - Lotação

- Capacidade
- Frota
- Extensão das Rotas
- Linearidade das Rotas e Tempos de Viagem
- Rede:
  - Atendimento da Demanda
  - Número de linhas
  - Transferências
  - Área de Cobertura e Espaçamento de Pontos de Parada
  - Rotas e Infraestrutura existente
- Viabilidade da Rede:
  - Nós únicos;
  - Atendimento dos Nós;
  - Rotas Conectadas;
  - Rotas Únicas

3.5.1 *Frequências e Intervalos*

A frequência de cada uma das linhas de ônibus deve estar compreendida no intervalo entre uma frequência mínima e uma frequência máxima. Esta restrição existe uma vez que as frequências não podem ser muito baixas para evitar longos tempos de espera dos usuários, que reduzem a atratividade dos serviços. Por outro lado, não devem ser muito altas pelas dificuldades adicionais de operação e manutenção do intervalo (*headway*), pois, devido às variabilidades dos tempos parados em pontos de ônibus e semáforos, pode ocorrer o efeito de sanfonamento dos ônibus. No sanfonamento os ônibus se agrupam, prejudicando a oferta do serviço com um intervalo constante ao usuário, reduzindo a confiabilidade e gerando prejuízos na operação. Os reflexos são tempos de espera e lotações mais variáveis nos serviços.

A definição do que seriam limites adequados de frequências varia de acordo com os recursos, o tamanho de cada cidade e a estrutura de rede de transporte público adotada. No município de São Paulo, por exemplo, a frequência máxima considerando-se todas as linhas (conforme operação em novembro de 2019) é 30 partidas por hora (2 minutos de intervalo), enquanto a frequência mínima horária é de 1 partida (60 minutos de intervalo) para as horas do período de operação da linha. Entretanto, para linhas estruturais de sistemas tronco-alimentados, esta frequência mínima deve ser acima de 6 a 8 partidas por hora para garantir

baixos tempos de espera e confiabilidade no serviço. A rede estrutural de transporte público por ônibus de Barcelona, por exemplo, é composta de 28 linhas com intervalos de 5 a 8 minutos (entre 7,5 e 12 partidas/hora).

No relatório de melhores práticas de planejamento de transporte público do *Center for Urban Transportation Research* da Universidade da Flórida (MISTRETTA *et al.*, 2009), é apontado que os intervalos adotados nos serviços devem considerar os seguintes aspectos para sua definição: intervalos baseados na política do projeto (*policy*) e intervalos baseados na demanda.

Os intervalos adotados por política de projeto são intervalos mínimos adotados para garantir uma boa qualidade de serviço ao usuário, oferecendo reduzidos tempos de espera, mesmo que a linha não tenha demanda elevada. No caso das madrugadas, por exemplo, a demanda pode não ser suficiente para mais de 1 partida por hora; entretanto, a fim de reduzir o tempo de espera, podem ser propostos intervalos de 30 ou 15 minutos, por exemplo. Nos intervalos escolhidos por demanda, a frequência das linhas é definida a partir da demanda da mesma, de forma a considerar o limite da lotação de projeto para o veículo adotado.

3.5.2 Lotação

A lotação máxima dos veículos deve ser limitada em função da capacidade física de transporte a partir da configuração interna (layout) e peso. Os critérios de projeto variam de cidade a cidade. No Brasil, não existe uma regra ou uma lei que defina a lotação máxima permitida nos transportes públicos em nível nacional. Em geral, essa limitação decorre da capacidade física dos veículos. Na prática, os veículos possuem uma capacidade física e operacional limitada, portanto, valores altos como os mencionados já prejudicam muito a qualidade do serviço. Cabe aos planejadores e gestores escolher para qual nível de serviço a rede será projetada. Sugere-se que para níveis de conforto adequado a lotação máxima não ultrapasse o valor de 4 passageiros/m² para veículos de maior porte e 3 passageiros/m² para veículos menores como micro-ônibus, devido ao menor espaço de circulação interna nestes últimos.

3.5.3 Capacidade

A capacidade é uma restrição que está associada às vias, aos veículos, aos pontos de parada e aos terminais utilizados no sistema de transporte público. Nas linhas a capacidade total

é expressa em passageiros/hora/sentido e depende da frequência e da lotação de projeto adotada. A partir de uma definição de frequência da linha e do tamanho de veículo utilizado, a capacidade total de transporte por hora/sentido é o produto das duas. O total de passageiros transportados em qualquer trecho da linha não deve ultrapassar esse valor.

Além disso, a capacidade das vias é uma restrição adicional. Cada segmento do sistema viário possui uma capacidade limitada de veículos/hora, em função do tamanho dos veículos, da estrutura da via, da quantidade de semáforos e do nível de separação entre os veículos particulares e os ônibus (Kittelson & Associates *et al.*, 2013). Entretanto, este tipo de capacidade não é considerada nos trabalhos pesquisados, sendo uma simplificação adotada pelos pesquisadores. Embora seja recomendado que o projeto da rede considere a capacidade viária, esta simplificação é recorrente em virtude do benefício na redução da complexidade da modelagem do problema.

Os pontos de parada e os terminais também têm limitações de espaço físico que podem afetar as velocidades de operação das linhas. Os terminais possuem uma limitação de espaço físico, portanto, podem receber um número finito de linhas. Os pontos de parada têm limitações devido ao número limitado de veículos que podem realizar operação de embarque e desembarque simultaneamente no ponto. Entretanto, as capacidades dos pontos de parada e dos terminais não foram consideradas nos estudos analisados, já que em geral os limites máximos são superiores aos exigidos pelos projetos de rede.

3.5.4 Frota

Nos trabalhos avaliados a frota é o indicador que normalmente representa os custos do sistema e deve ser minimizada. Alternativamente, a frota pode ser considerada como restrição nos modelos matemáticos para se enquadrar até um determinado limite, como em Amiripour *et al.* (2015). Na prática, a frota é de fato limitada em função da disponibilidade de veículos de cada tamanho e dos recursos para aquisição de novos veículos. A grande maioria dos trabalhos analisados consideram simplificadamente um único tipo de veículo no projeto de rede de ônibus, a exceção de Bagloee e Ceder (2011) e Abedin *et al.* (2018).

3.5.5 Extensão das Rotas

Os modelos têm de restringir o comprimento das rotas por questões operacionais, pois uma rota muito extensa dificulta o controle dos intervalos entre os veículos. Isso ocorre devido

ao fato de, quanto maior a extensão da rota, mais cruzamentos semaforizados existem ao longo do itinerário e mais pontos de parada são atendidos. Com isso, há uma tendência a aumentar a variabilidade do tempo de ciclo da linha, causando, por sua vez, um aumento da variabilidade do intervalo efetivamente verificado pelo usuário. Esse aumento da variabilidade do intervalo causa uma redução da confiabilidade da linha de ônibus, um dos atributos de qualidade (seção 1.3) que deve ser atendido para um bom nível de serviço.

Já linhas muito curtas podem ser ineficientes, pois não agregariam uma demanda suficiente para serem rentáveis. A definição do fato da linha ser curta ou longa é relativa ao tamanho da rede real considerada.

3.5.6 *Linearidade das Linhas e Tempos de Viagem*

A linearidade da linha é sua propriedade de ligar da forma mais direta possível todos os pares origem e destino a que ela atende. O termo direto, neste caso, significa o trajeto mais rápido possível considerando o sistema viário existente. Conforme apresentado na seção 1.3, o tempo de viagem é um dos principais atributos de qualidade de um sistema de transporte público.

Dessa forma, os tempos de viagem devem ser os mais próximos do menor caminho quanto possíveis. Este atributo é definido como uma restrição nos modelos matemáticos, por exemplo em Arbex e Cunha (2015) e em Zhao *et al.* (2015). Ambos estudos incluem um fator máximo de desvio das rotas dividindo o tempo de viagem na rota pelo o tempo de viagem pelo caminho mais curto como restrição no modelo. Amiripour *et al.* (2015) considera um fator de até 60% a mais no tempo de viagem de uma rota em comparação com o tempo de viagem mais curto entre seu ponto inicial e final. Na literatura, Ceder (2015) propõe um limite superior para o tempo de viagem das linhas de 20-50% a mais que o tempo de viagem mais rápido por automóvel.

Além disso, uma rede de transporte público deve também ser de fácil compreensão, utilização e assimilação da sua estrutura geral pelos usuários existentes, assim como de simples aprendizado para novos usuários. Desta forma, a linearidade das rotas (na literatura conhecida pelo termo *route directness*) deve ser a maior possível, de forma a deixar a rede de transportes também legível nos mapas aos usuários. A nova rede de transporte público por ônibus de Barcelona, a Nova Xarxa, foi projetada com a ideia de ser “mais fácil de ser usada, com novas linhas seguindo caminhos mais diretos, projetadas para aumentar a eficiência e a lógica do layout, para deixar as viagens mais suaves para os usuários” (tradução livre) (TMB, 2019a).

3.5.7 *Atendimento da Demanda*

Chakroborty e Dwivedi (2002) mencionam que a rede de transporte deve satisfazer a maior parte, senão toda, demanda existente de transporte público. Uma restrição do PRTP é o percentual de atendimento à demanda, que pode ser de 100%. Para que uma demanda seja considerada atendida na rede, Guihaire e Hao (2008) sugerem que, de uma forma geral, se uma viagem requer mais de duas transferências, é assumido que o usuário vai trocar para outro meio de transporte, não utilizando o transporte público. Ou mesmo a viagem não será realizada, sendo uma demanda reprimida, caso o usuário não tenha acesso a outro meio de transporte que possa realizar aquela viagem de forma competitiva quanto a custo, conforto e tempo de viagem total. Alguns trabalhos incluem a demanda não atendida diretamente na função objetivo (AFANDIZADEH; KHAKSAR; KALANTARI, 2013; AMIRIPOUR; CEDER; MOHAYMANY, 2014a).

3.5.8 *Número de linhas*

Em um sistema real, o número ideal de linhas é de difícil determinação, já que podem existir diferentes configurações de rede que atendam às outras restrições com diferentes números de linhas. Entretanto, esse pode ser um fator limitador da complexidade do sistema para o usuário. Reduzir o número de linhas em uma rede facilita a informação do sistema ao usuário. Cabe ressaltar que não existe uma definição do que seria um número elevado de linhas, pois é um conceito relativo à extensão da área urbanizada da cidade, ao número de nós, entre outros fatores. Tanto é que na literatura não foram encontradas diretrizes para o número mínimo/máximo de linhas.

3.5.9 *Transferências*

As transferências são necessárias quando não é possível viajar de um local a outro através de uma única linha. Dessa forma é obrigatória a utilização de dois ou mais serviços, que atendem o mesmo ponto de parada ou servem pontos de parada próximos, de tal forma que o usuário possa caminhar de um serviço ao outro. Entretanto, para toda transferência existe uma penalidade percebida pelo usuário. Wardman (2001) realizou uma meta-análise sobre estudos de percepção de tempos em transporte no Reino Unido e encontrou que a mediana da percepção da penalidade de transferência nestes estudos era de 13,5 minutos. Isso indica uma necessidade de restringir as transferências para melhorar a qualidade percebida da viagem pelo usuário.

3.5.10 Área de Cobertura e Espaçamento de Pontos de Parada

A área de cobertura é a percentagem estimada da população que pode, em teoria, ser servida por transporte público ao poder acessar um ponto de parada e depende de características como extensão da rota, espaçamento dos pontos de parada e espaçamento entre rotas paralelas (GUIHAIRE; HAO, 2008).

Essa restrição faz parte do PRTP, porém, para efeitos de simplificação, grande parte dos trabalhos não inclui a definição de pontos de parada na rede, nem o cálculo do espaçamento de pontos de parada. No caso do presente trabalho, assim como a maior parte dos trabalhos revisados, considera-se que a demanda tem acesso ao sistema através de um dos nós do sistema viário simplificado, e a demanda total já é dado de entrada.

3.5.11 Rotas e Infraestrutura existente

Pode não ser desejável acabar com o serviço de algumas linhas já existentes na rede atual (GUIHAIRE; HAO, 2008). Empresários podem ter resistência a mudar ou eliminar algumas linhas que tenham alta demanda ou que historicamente sejam muito rentáveis. Adiciona-se a isso a dificuldade de implantação de grandes mudanças repentinas para a população, que já possui um certo conhecimento sobre a rede de transportes. Desta forma, principalmente nas grandes cidades, mudanças devem ser graduais e baseadas em um sistema de informação que auxilie a população sobre as mudanças, mostrando as suas novas opções de serviços de transporte. Neste trabalho, embora o método possa ser adaptado em pesquisa futura, não será considerada a rede estrutural existente; a metodologia projeta uma nova rede estrutural.

3.5.12 Nós únicos (viabilidade da rede)

Uma vez formada uma rede de linhas para avaliação, esta rede deve também atender a critérios de viabilidade. Uma delas é que nenhuma rota deste conjunto deve atender um mesmo nó do sistema viário simplificado duas vezes, ou seja, os nós devem ser únicos em cada uma das rotas, embora possa ser atendido por mais de uma rota na rede. Chakroborty (2003) destaca que as rotas não devem voltar (*backtrack*), embora iniba rotas circulares, onde o ponto inicial e final da rota é o mesmo.

3.5.13 Atendimento dos nós (viabilidade da rede)

Todos os nós da rede são atendidos por ao menos uma rota. Dessa forma, todos os passageiros podem iniciar suas viagens no sistema de transportes. Todavia, algumas dessas viagens podem exigir mais de duas transferências, tornando estas demandas não atendidas. Neste trabalho, esta restrição é adaptada de forma que todos os terminais de ônibus previamente selecionados devem ser atendidos.

3.5.14 Rotas Conectadas (viabilidade da rede)

Esta restrição implica que o conjunto de todas as rotas da rede é conectado. Isto é, existe a possibilidade de alcançar *qualquer outro nó* da rede partindo de um nó inicial. Entretanto, essa restrição não garante o atendimento à toda a demanda, já que alguma dessas viagens pode exigir duas ou mais transferências, tornando-a não atendida.

3.5.15 Rotas Únicas (viabilidade da rede)

Esta restrição implica que a mesma rota não pode aparecer repetida em uma rede. Assim, todas as rotas devem ser únicas na rede, com uma sequência de nós única para cada uma delas.

3.6 Variáveis de Decisão

Não foram observadas diferenças entre as variáveis de decisão do PRTP dentre os trabalhos avaliados: sempre envolvem a definição do traçado das rotas incluindo ou não as frequências de operação. O traçado das rotas é a sequência de nós atendidos, ao passo que as frequências de operação correspondem ao número de partidas de cada serviço em um intervalo de tempo de uma hora.

Além dessas duas variáveis, inclui-se também o tipo de veículo (ônibus convencional, *padron*, articulado ou biarticulado, por exemplo) que cada rota utilizará. Nesta tese, será considerado um veículo de tamanho único, assim como na grande maioria dos trabalhos de PRTP revisados, à exceção de Abedin *et al.* (2018).

3.7 Dados de Entrada

Nesta seção são detalhados os principais dados de entrada (*inputs*) encontrados nos trabalhos que foram pesquisados: a matriz de demanda, a representação do sistema viário e a rede existente.

3.7.1 Matriz de Demanda

Nos trabalhos revisados, a matriz de demanda é considerada como dado de entrada externo com um total de viagens por transporte público fixo. Incluir a demanda de transporte individual torna o problema mais difícil, já que exige uma parte metodológica de divisão modal, como encontrado em Fan e Machemehl (2006). Assim, é comum na literatura do PRTP a matriz de viagens total de transporte público fixa para um intervalo de tempo determinado.

Neste trabalho, são utilizadas de matrizes origem-destino estimadas a partir de processamento de bilhetagem eletrônica. Para uma revisão bibliográfica específica de uso de dados de bilhetagem eletrônica no planejamento de transporte público e estimação de matrizes origem-destino, tema que tem sido objeto de pesquisa nos últimos anos, o leitor é referido ao APÊNDICE B.

3.7.2 Sistema Viário

A representação do sistema viário real é feita através de nós (*nodes*) e arcos (*links*), sendo nós os pontos de interseção das vias, e os *links* as representações das vias, conectando dois nós. As vias consideradas nesta representação para traçar as rotas no projeto da rede fazem parte do conjunto de dados de entrada comumente utilizados.

Na revisão da literatura verificou-se que as redes viárias utilizadas são simplificações bastante expressivas do sistema real. Isso é necessário para a redução da complexidade computacional dos métodos, uma vez que trabalharão com algoritmos de busca de caminhos em grafos com um grande número de nós. Entretanto, essas simplificações da rede viária restringem o espaço de soluções para as redes projetadas.

Heyken-Soares *et al.* (2019) apresentam um procedimento de diminuição da escala da rede viária real para um tamanho tratável por métodos de otimização baseados em meta-heurísticas. Os autores argumentam que é importante que uma representação do sistema viário

para o PRTP reflita suficientemente as características da rede viária real, principalmente no sentido de reduzir o tempo computacional necessário para encontrar soluções.

3.7.3 Tempos de Viagem

Os tempos de viagem nos *links* do sistema viário adotado pelo modelo advêm das velocidades operacionais observadas nas vias no sistema atual ou do tempo necessário para percorrê-las utilizando a velocidade máxima permitida. Idealmente, os tempos de viagem devem ser considerados nos *links* como função do volume e tipo de veículos que o percorrem. Entretanto, a incorporação desse cálculo aumenta a complexidade da modelagem, e acaba sendo simplificada. Nos trabalhos analisados os *links* possuem tempos de viagem fixos. Por exemplo, em seu procedimento para criar redes viárias simplificadas para PRTP, Heyken-Soares *et al.* (2019) calculam o tempo de viagem nos *links* através do caminho mais rápido entre dois nós diretamente conectados.

3.7.4 Rede e Infraestrutura existente

A rede de linhas e a infraestrutura de transporte por trilhos existentes podem ser consideradas como dado de entrada, sendo uma restrição devido à dificuldade de mudanças ou para auxílio na definição das linhas para o projeto da rede. Em Amiripour *et al.* (2015), os autores utilizam as linhas existentes para fazerem parte de um conjunto de linhas possíveis de serem utilizadas. Além disso, a rede existente pode ser também utilizada para fins de comparação da qualidade da rede, como em Heyken-Soares *et al.* (2019).

3.8 Métodos de Solução

Nesta seção são descritos os principais métodos de solução adotados e suas características. São destacadas as especificidades encontradas nas metodologias propostas e demais aspectos metodológicos relevantes.

O PRTP é um problema de otimização NP-difícil onde formulações de programação matemática tradicionais não podem ser aplicadas de forma eficiente (BAAJ; MAHMASSANI, 1991). Os autores também mencionam 5 fontes de complexidade do PRTP: 1) dificuldade de formulação matemática pela função objetivo não incluir a sequência de nós das linhas; 2) as não-linearidades e não-convexidades do problema, como, por exemplo, a inserção de mais

ônibus na rede pode gerar tempos de viagem maiores aos usuários devido à redução da velocidade operacional, aumentando ambos os custos dos usuários e dos operadores (Isso pode acontecer pois, uma maior quantidade de veículos na rede pode reduzir as velocidades médias das vias por problemas de saturação das mesmas, gerando um maior tempo de viagem aos passageiros, ou seja, tanto os custos dos usuários como dos operadores seriam aumentados com a adição de mais veículos); 3) explosão combinatória da natureza discreta do problema de desenho de rotas; 4) natureza multi-objetivo do problema (demanda total atendida, componentes do tempos de viagem e custos dos operadores) e 5) disposição espacial das rotas, pois é difícil caracterizar formalmente uma “boa” disposição eficiente (BAAJ; MAHMASSANI, 1991).

O PRTP é um problema combinatório NP-difícil (CHAKROBORTY, 2003) cujo tempo de processamento apenas dos custos dos usuários aumenta em função de $f(N^3)$, onde N é o número de nós na rede (HEYKEN SOARES *et al.*, 2019). Devem ser definidas a quantidade de linhas, os terminais de origem e destino de cada uma, a frequência de operação e o itinerário no sistema viário, sendo que apenas este último pode chegar na ordem de dezenas de milhares de trajetos possíveis apenas para uma linha. Incluindo-se questões como definição do número dos terminais, sua capacidade e o tamanho de veículos gera uma complexidade mais elevada. Dessa forma, é importante adotar simplificações de forma a ser eficaz na geração de soluções.

Quanto aos métodos de solução, devido a essa natureza combinatória e ao tamanho do problema, os trabalhos encontrados na literatura focam em métodos heurísticos. Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) separaram estes métodos heurísticos em dois grupos diferentes: geração e configuração de rotas (*route generation and configuration*) e construção e melhoria de rotas (*route construction and improvement*), conforme apresentados no diagrama da Figura 3.4 e detalhados nas subseções a seguir.

3.8.1 Geração e Configuração de Rotas

O método de geração e configuração de rotas inicia com a geração de um conjunto fixo de rotas candidatas à rede, onde cada solução conterá um subgrupo de rotas deste conjunto, como em Pattnaik *et al.* (1998), Cipriani *et al.* (2012), Afandizadeh *et al.* (2013), Arbex e Cunha (2015) e Jha *et al.* (2019).

Nos trabalhos que utilizam este conjunto (ou banco) de rotas, elas devem ser geradas no início do processo, em um procedimento que já leve em conta as restrições pertinentes à criação

das rotas descritas na seção 3.5. De acordo com Kiliç e Gok (2014), a eficiência dos algoritmos de geração de rotas para projeto de redes depende principalmente de dois fatores: (1) da qualidade do conjunto de rotas inicialmente criado e (2) dos procedimentos de busca usados para explorar o espaço de busca.

Figura 3.4: Diagrama heurístico típico do PRTP.

Fonte: Traduzido de Kepaptsoglou e Karlaftis (2009).

Quanto à criação do conjunto de rotas, os principais algoritmos utilizados para esta geração das rotas são os de caminho mínimo. São aplicados os algoritmos de caminho mínimo de Dijkstra (1959) e os que consideram k caminhos mínimos, como o de Yen (1971). Este último permite uma maior variedade dos trajetos das linhas, diversificando as possibilidades de traçado, que permite o atendimento de mais pares origem-destino. Uma comparação de algoritmos que resolvem o problema dos k caminhos mínimos está disponível em Kykuta (2018).

No método de conjunto de rotas, heurísticas são utilizadas para a geração do conjunto de rotas candidatas e uma outra heurística ou meta-heurística é utilizada para a busca pela configuração de rotas, isto é, a seleção de um subconjunto do banco de rotas para compor a solução. Especificamente na parte de busca pela configuração de rotas no método de Geração de Rotas, a meta-heurística mais aplicada são os Algoritmos Genéticos (PATRNAIK; MOHAN; TOM, 1998; CHAKROBORTY; WIVEDI, 2002; TOM; MOHAN, 2003; CIPRIANI, 2006; FAN; MACHEMEHL, 2006; SZETO; WU, 2011; CHEW; LEE, 2012;

CIPRIANI; GORI; PETRELLI, 2012; AFANDIZADEH; KHAKSAR; KALANTARI, 2013; CHEW; LEE; SEOW, 2013; AMIRIPOUR; MOHAYMANY; CEDER, 2015; ARBEX; DA CUNHA, 2015).

Recentemente, alguns trabalhos utilizaram um algoritmo derivado dos Algoritmos Genéticos voltado especificamente para solução de problemas multiobjetivos, chamado de NSGA-II (DEB *et al.*, 2002). Este é um algoritmo de ordenamento de soluções não-dominadas com um mecanismo de preservação de diversidade das soluções próprio à natureza multiobjetivo do PRTP. Ao utilizar o NSGA-II os autores identificam fronteiras de Pareto com relação a objetivos adotados. O método foi aplicado por Jha *et al.* (2019), Abedin (ABEDIN, 2019) e Chai e Liang (2020) com bons resultados nas instâncias de teste.

Especificamente com relação aos Algoritmos Genéticos, a forma de representação da solução é importante na implementação dos algoritmos. Alguns trabalhos propõem uma representação em *string* para os cromossomos (CHAKROBORTY; WIVEDI, 2002; ZHAO; XU; JIANG, 2015), conforme ilustrado na Figura 3.5. Nessa representação, uma solução é composta da ordem de passagem dos nós de cada linha, sequencialmente para todas as linhas da rede.

Além dessa representação, a representação de *string* binária também é utilizada, ou seja, uma solução é representada por uma sequência indicando se a rota do conjunto está ou não contida na rede final. Em Amiripour *et al.* (2014b), para cada linha do conjunto total de linhas possíveis é atribuído o valor de 0 ou 1, conforme Figura 3.6. Caso a linha seja de fato escolhida para a solução, o valor de 1 é atribuído; caso não, o valor 0 é adotado. Como os Algoritmos Genéticos compõem a solução proposta pelo presente trabalho, ele será melhor explicado no Capítulo 5.

Figura 3.5: Representação em *string* de uma solução do PRTP, onde n_x representa um nó da rede.

Fonte: Traduzido de Chakroborty e Dwivedi (2002).

Figura 3.6: Representação com *string* binária.

Fonte: Traduzido de Amiripour *et al.* (2014b).

Os métodos de solução utilizando geração e configuração de rotas são similares, com três etapas principais (Baaj e Mahmassani, 1991; Afandizadeh *et al.*, 2013; Arbex e Cunha, 2015): o primeiro procedimento é o de geração de rotas candidatas, cuja finalidade é gerar rotas viáveis considerando as restrições do problema e criar o conjunto de rotas; o segundo é um procedimento de análise de rede, responsável pela alocação da demanda, cálculo de frequências das linhas e das funções objetivo. Por último, é aplicada a meta-heurística de busca adotada para procurar a melhor configuração de rede. Os fluxogramas esquemáticos na Figura 3.7 e na Figura 3.8 mostram, respectivamente, a metodologia aplicada em Afandizadeh *et al.* (2013) e Arbex e Cunha (2015) que seguem esta estrutura.

3.8.2 Construção e Melhoria de Rotas

O outro grupo dos métodos heurísticos promove a construção das rotas com base em heurísticas ou meta-heurísticas diretamente, seguindo-se uma melhoria das rotas ao longo do processo de busca, como em Baaj e Mahmassani (1991), Chakroborty e Dwivedi (2002), Fan *et al.* (2009), Zhao *et al.* (2015), Buba e Lee (2016) e Ahmed *et al.* (2018).

Nos métodos de criação e melhoria das rotas, meta-heurísticas podem ser utilizadas diretamente para a construção das rotas, por exemplo, como em Nikolić e Teodorović (2013), que utiliza colônia de abelhas.

Operadores podem ser utilizados para busca local ou mudança de rotas para melhoria da solução. Por exemplo, em Chakroborty e Dwivedi (2002), Ngamchai e Lovell (2003) e Mumford (2013) operadores foram utilizados para gerar novas rotas através da recombinação de trechos de rotas entre elas.

Figura 3.7: Método de solução aplicado em Afandizadeh *et al.* (2013).

Fonte: Traduzido de Afandizadeh *et al.* (2013).

Figura 3.8: Fluxograma do método utilizado em Arbex e Cunha (2015).

Fonte: Traduzido de Arbex e Cunha (2015).

Nesses métodos, encontramos operadores de busca local, que modificam as linhas, seja por adição ou eliminação, nos extremos das linhas, ou mesmo troca de segmentos inteiros das linhas com outras linhas. Por exemplo em Baaj e Mahmassani (1995) e em Amiripour *et al.* (2015), aplica-se um procedimento de extensão das rotas, onde são adicionados nós nos extremos das linhas e é feita uma reavaliação da rede, verificando se ela ainda atende às restrições e é melhor que a rede anterior.

Em Mumford (2013), são aplicados operadores que trocam segmentos de linhas, criando-se novas linhas. Além desse, também é utilizado um operador de reparo, que busca adicionar nós não atendidos da rede às linhas existentes, de modo a tornar a rede viável. Em Zhao *et al.* (2015), são aplicados algoritmos de troca de segmentos ou modificação de linhas. Em Kiliç e Gok (2014), existem três procedimentos de modificação das linhas: (1) adicionar nó, que adiciona um nó seja no início ou no final da rota, para adicionar os nós não atendidos na rede; (2) inserir nó: que insere um nó no meio da rota e (3) expandir rota: que cria, a partir dos nós ainda não atendidos da rede, uma caminho mínimo até um extremo de uma linha existente.

Ahmed *et al.* (2018) utiliza hiper-heurísticas de seleção para controlar um conjunto de sete heurísticas para melhorar a qualidade de uma rede. Hiper-heurísticas são técnicas de busca de propósito geral que exploram o espaço de aplicação de heurísticas de baixo nível para melhorar uma solução do projeto da rede otimizada iterativamente (AHMED; MUMFORD; KHEIRI, 2018). As heurísticas utilizadas na pesquisa estão apresentadas na Figura 3.9, sendo compostas de movimentos que modificam a sequência de nós que as linhas atendem. Estes movimentos podem ser aplicados a uma linha isoladamente, ou a linhas duas a duas.

A partir das duas definições dos grupos de metodologia, a questão que surge é qual é a abordagem que gera as melhores redes. Essa questão é de difícil resposta, já que ambas as abordagens geraram boas soluções na instância teste de Mandl (1979), principal instância teste desse problema na literatura. Para redes maiores, após análise da literatura ainda não é possível afirmar qual abordagem gera as melhores soluções.

Uma desvantagem deste modelo é que qualquer alteração, mesmo que muito pequena (inserção de um nó a mais em uma única rota), exige recálculo das funções objetivo e verificação de atendimento às restrições que podem ser computacionalmente custosas.

Figura 3.9: Descrição das heurísticas de modificação de rotas aplicadas em Ahmed *et al.* (2018). Arcos retos são links na rota, arcos tracejados são links removidos e arcos curvos são links adicionados após a aplicação da heurística.

Fonte: Traduzido de Ahmed *et al.* (2018).

3.8.3 Alocação da Demanda

Com a solução formada em termos das rotas a serem criadas, a demanda deve ser alocada à rede; em outras palavras, a distribuição da demanda de todos os pares origens e destinos nos trajetos para realizarem suas viagens. Após esta etapa, todas as linhas têm o volume estimado de passageiros para cada trecho entre os nós atendidos, possibilitando o cálculo da frequência necessária para operação da linha. Essa parte costuma ser simplificada e pouco discutida nos estudos analisados.

A alocação da demanda é um subproblema do PRTP que por si só suscita diversos conceitos e considerações importantes. A alocação da demanda em redes de transporte público

tem sido objeto de pesquisa há alguns anos (CHRIQUI; ROBILLARD, 1975; SPIESS; FLORIAN, 1989), com novas abordagens recentes, considerando principalmente lotação e capacidade dos veículos (DE CEA; FERNANDEZ, 1993; LAM et al., 1999; KURAUCHI; BELL; SCHMÖCKER, 2003; HAMDOUCH et al., 2011; SCHMÖCKER et al., 2011).

Szeto *et al.* (2011) mencionam que o método mais comum de alocação é o baseado em frequência (*frequency-based*) de Chriqui e Robillard (1975), que foi generalizado nos conceitos de estratégia e hipercaminhos (*hyperpath*) de Spiess e Florian (1989). Embora o método baseado em frequência ignore os horários detalhados de chegadas e partidas, estes modelos são mais eficientes computacionalmente e podem comportar redes maiores, sendo apropriadas para o planejamento estratégico e de longo prazo das redes de transporte público (Szeto *et al.*, 2011).

Essas considerações mais avançadas, embora busquem prover maior realismo aos métodos, envolvem uma maior complexidade dos modelos de alocação, aumentando os tempos de processamento e, dessa forma, consomem um tempo computacional que diminui a eficiência da busca por melhores soluções pelas heurísticas. Uma alternativa para considerar a capacidade e lotação dos veículos é realizar a alocação e apenas depois fazer o cálculo da frequência necessária para cada linha, de modo a atender à restrição de capacidade dos veículos.

Com essa perspectiva, trabalhos que focam no projeto de redes de transporte público com cálculo de frequências não implementam algoritmos complexos de alocação, aplicando um algoritmo mais simplificado. Isso é necessário também pois a alocação deve ser efetuada em cada solução avaliada e utiliza boa parte do tempo computável empregado na busca. Dessa forma, Baaj e Mahmassani (1991), em sua metodologia, alocam a demanda de cada par origem-destino procurando, primeiramente, se ela pode ser atendida por uma ligação direta (sem transferência). Caso não exista, é procurada uma possibilidade com uma transferência, e, caso não exista, finalmente com duas transferências.

Arbex e Cunha (2015) aplicam uma metodologia semelhante. Se existe uma possibilidade de ligação direta, ela é utilizada; caso existam duas ou mais linhas que liguem diretamente os pares origem-destino em questão, então a demanda se divide em função da proporção das frequências das linhas. Caso não seja possível a utilização de uma linha direta, uma transferência é necessária. É realizada uma busca para encontrar as opções de ligações utilizando uma transferência e uma distribuição por um modelo *logit* é utilizada. Caso ainda não seja possível com uma transferência, é realizada uma busca para encontrar as possibilidades com duas transferências, aplicando a mesma lógica de distribuição através de um modelo *logit*, considerando o tempo generalizado das opções como utilidade.

Já Amiripour *et al.* (2014b) argumenta a favor do uso de alocação tudo-ou-nada, onde a demanda é direcionada inteiramente ao trajeto que possui o menor tempo de viagem total, incluindo tempo da penalidade de transferências. Os autores relatam que a alocação tudo-ou-nada é um dos métodos mais rápidos adequados à metodologia, pois outros métodos aumentam o tempo computacional e trazem uma complexidade desnecessária ao problema.

Entretanto, métodos mais avançados de alocação refletem melhor as decisões dos usuários, principalmente quando estes podem utilizar mais de uma linha para sua viagem. Este problema é conhecido como linhas em comum (*common bus lines*) (CHRIQUI; ROBILLARD, 1975). Portanto, métodos de alocação mais fidedignos ao comportamento observado dos usuários permitem uma estimativa mais acertada da demanda das linhas, logo, um dimensionamento mais preciso das frequências e capacidades dos veículos.

Existem programas comerciais que implementam algoritmos avançados de alocação de transporte público, como por exemplo o EMME (INRO, 2019), Cube (CITILABS, 2019) e PTV Visum (PTV, 2019). Cipriani *et al.* (2012) utilizaram o software EMME para a alocação da demanda no projeto de rede para a cidade de Roma, na Itália. Recentemente, Abedin (ABEDIN, 2019) utilizou a implementação do algoritmo de alocação baseado em intervalo (*headway-based*) do PTV Visum. Avalia-se que a utilização de softwares comerciais nesta etapa da metodologia é uma forma de potencializar um algoritmo mais avançado de alocação sem o esforço de implementá-lo, focando ao máximo na metodologia de projeto de redes em si. Em contrapartida, deve ser rigorosamente avaliado o tempo de processamento pois será necessária a avaliação de milhares de soluções de rede.

3.9 Instâncias Utilizadas em Experimentos Computacionais e Aplicações

As metodologias propostas pelos autores ainda são pouco aplicadas a instâncias reais devido às especificidades do problema real de PRTP e da dificuldade de considerar todas as restrições do problema nos modelos. Assim, observa-se mais a aplicação dos métodos a uma instância teste que se consolidou como a principal na literatura, inicialmente apresentada por Mandl (1979), sendo uma simplificação de um sistema viário ligando 15 localidades que representam pequenas regiões da Suíça através de 21 *links*, com demanda total de 15.570 viagens, simétrica, distribuídas em 1 hora, com 76% de pares origem-destino não nulos. Artigos que aplicaram seus métodos de solução na rede de Mandl (1979) são, dentre outros: Baaj e Mahmassani (1991), Kidwai (1998), Afandizadeh *et al.* (2013), Mumford (2013), Chew *et al.*

(2013), Nikolić e Teodorović (2013), Zhao *et al.* (2015), Arbex e Cunha (2015), Buba e Lee (2016), Islam *et al.* (2019) e Jha *et al.* (2019).

Além de Mandl (1979), Mumford (2013) propôs algumas instâncias na mesma estrutura de arquivos de Mandl (1979), porém com maiores ordens de grandeza quanto ao número de nós e *links*. Para projeto de redes estruturais de um sistema baseado na tronco-alimentação, os dados de entrada precisam ser adaptados, com a inclusão dos terminais localizados na região de estudo e suas capacidades, caso seja utilizada na modelagem.

O projeto de uma rede hierarquizada para sistemas de transporte público multimodal é proposto por Bagloee e Ceder (2011), e mais recentemente por Abedin *et al.* (2018) e Huang (2018). Abedin *et al.* (2018) propõe um sistema hierárquico com a divisão das linhas de ônibus em estruturais e locais e aplica o método proposto às instâncias de Mumford, que contém até 127 nós. Porém as linhas estruturais propostas podem iniciar a partir de qualquer um dos 127 nós da rede, o que não corresponde à operação na prática da estrutura tronco-alimentada, onde as linhas estruturais se concentram em uma quantidade restrita de terminais e circulam por um subconjunto de vias.

Os resultados das aplicações dos métodos de solução dos trabalhos revisados da literatura são importantes para destacar o benefício potencial dessas soluções a problemas de transporte em cidades reais. Alguns trabalhos já aplicaram estes métodos a cidades de médio porte, como: Baaj e Mahmassani (1995), em Austin, Texas; Pattnaik *et al.* (1998), em Madras, Índia (25 nós e 39 *links*); Carrese e Gori (2002), em Roma, Itália; Tom e Mohan (2003), para Chennai, Índia (75 nós e 125 *links*); Szeto e Wu (2011) para uma região de Hong Kong, China; Bagloee e Ceder (2011) para Chicago, EUA, Afandizadeh *et al.* (2013) e Amiripour *et al.* (2014a) para a cidade de Mashhad, Irã e Szeto e Jiang (2014) para Winnipeg, Canadá.

Cipriani *et al.* (2012) aplicam o método de geração e configuração de rotas para a cidade de Roma, na Itália. A comparação entre os desempenhos das redes atual e otimizada mostrou, apesar de um aumento de 3,7% no número de transferências, reduções de 60% no número de linhas; de 20% no veículo-km; de 16,6% nos tempos de viagem dentro dos veículos, 33% no tempo de espera e 60% mais demanda atendida.

Esses números da aplicação do método de solução à cidade de Roma mostram alguns dos benefícios quantificáveis advindos da otimização das rotas e suas respectivas frequências na rede de transporte público, fornecendo à população um serviço com menor tempo de viagem total e melhor atendimento à população.

Outra aplicação do método é feita em Afandizadeh *et al.* (2013), para Mashhad, segunda maior região metropolitana do Irã, com aproximadamente 3 milhões de habitantes, reduzindo o número de linhas em 6%, a frota total em 8,5% e o tempo de viagem total médio na rede em 46%. Amiripour *et al.* (2015) propõe uma modificação ótima para a mesma região, onde reporta melhora de 26% na função objetivo comparada com a situação atual com a modificação de 36% das linhas da rede atual em vigor em Mashhad.

3.10 Conclusão Crítica da Revisão da Literatura

Neste capítulo foram discutidos os seguintes aspectos do problema de projeto de redes de transporte público: funções objetivo, restrições, variáveis de decisão, dados de entrada, métodos de solução e instâncias no âmbito do PRTP. Nesta seção final é feita uma conclusão crítica da revisão da literatura.

A partir dos trabalhos revisados, conclui-se que o problema de projeto de redes de transporte público ainda tem muito espaço para desenvolvimento de métodos de solução que auxiliem a tomada de decisão adequados à escala dos problemas reais mais complexos. Nesse sentido, esta pesquisa contribui diretamente à literatura científica sob diversos aspectos, conforme apresentados no Quadro 3.2.

No Quadro 3.2, primeiramente uma das contribuições desta pesquisa é sua aplicação ao problema real da definição de linhas estruturais e suas respectivas frequências no contexto de sistemas tronco-alimentados de transporte público. Quanto às restrições, adicionalmente àquelas já consideradas em Arbex e Cunha (2015), é inclusa a restrição que alguns nós não podem ser início ou término de linhas.

Sobre os dados de entrada, na literatura científica a matriz origem-destino utilizada é sempre considerada como dado de entrada sem reflexão sobre sua origem e disponibilidade. A partir da utilização de dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento dos veículos, é possível estimar a matriz origem-destino de transporte público, criando a possibilidade para otimizações e melhorias da rede em períodos com pouca coleta por entrevistas domiciliares tradicionais, como viagens que ocorrem aos finais de semana. Com o uso dos dados de bilhetagem é possível calcular matrizes que serão dados de entrada dos métodos de PRTP.

Já quanto ao método de solução, propõe-se uma nova heurística específica ao problema para a elaboração do itinerário das linhas que serão avaliadas para a rede. Esta heurística possibilita filtrar potenciais itinerários candidatos que sejam competitivos quanto ao tempo de

viagem, número de caminhos diferentes entre os pares de terminais conectados e demanda potencial no trajeto. Além disso, o algoritmo de configuração de rotas para montar a rede é estruturado com dois Algoritmos Genéticos aplicados sequencialmente que projetam a rede estrutural em etapas, sendo inédita na literatura.

Quadro 3.2: Quadro resumo dos aspectos do problema e esta pesquisa.

Aspecto	Pesquisa
Problema*	<i>Transit Network Design and Frequency Setting Problem</i> (TNDFSP) aplicado a sistemas tronco-alimentados para definição de linhas estruturais de ônibus
Função Objetivo	Minimizar tempo generalizado de viagem e frota
Restrições	Intervalo, Extensão, Frota, Número de nós, Diretividade da rota, Número de Rotas, Nós que são apenas Terminais e/ou de passagem
Variáveis de Decisão	Rotas e Frequência
Dados de Entrada	Rede Viária, Tempos de Viagem nos Links, Nós, Terminais, Matriz de Demanda estimada por bilhetagem eletrônica e GPS, Número de linhas na rede entre um mínimo e máximo.
Método de Solução*	Construção das linhas potenciais entre terminais e seus itinerários com heurística específica ao problema Meta-heurística para escolha da rede: Dois Algoritmos Genéticos aplicados sequencialmente para projetar a rede em etapas
Instâncias*	Rede de sistema tronco-alimentado com dezenas de terminais em uma extensa área urbana
Análise de Sensibilidade*	Análise de sensibilidade que avalia diversos aspectos do projeto de rede, incluindo número de linhas na rede, extensão das linhas, linearidade das rotas, número de terminais e robustez da rede frente a diferentes demandas
Detalhamento da solução*	Detalha as soluções geradas no formato de sequência de nós em sequência de pontos de parada para modelagem da rede no formato GTFS

*com contribuição relevante à literatura científica

Por fim, quanto às instâncias, observou-se um número bastante reduzido de instâncias para teste de metodologias. Desta forma, esta pesquisa contribui à literatura com a apresentação de uma instância que representa uma rede de um sistema tronco-alimentado com dezenas de terminais em uma extensa área urbana, possibilitando no futuro a aplicação de outras metodologias pela comunidade científica.

Na literatura científica do PRTP a falta de padrão quanto aos métodos para alocação e cálculo dos indicadores das redes dificulta a comparabilidade dos resultados quanto aos objetivos dos operadores de redução de custos. Alguns trabalhos simplificam o cálculo da frota total para o indicador de soma de extensão percorrida pelas linhas, que não traduz a necessidade de mais veículos em função das diferenças de carregamento nas linhas.

Adicionalmente, o aspecto multiobjetivo do problema não é propriamente considerado em alguns trabalhos da literatura. São apresentados os melhores resultados sob o aspecto dos usuários e os melhores sob o aspecto dos operadores (CHEW; LEE; SEOW, 2013; KILIÇ; GÖK, 2014; AHMED; MUMFORD; KHEIRI, 2018), quando o mais importante para a tomada de decisão e implantação nas cidades é uma rede de transporte público que promova o equilíbrio sob os dois aspectos.

Outro gap observado na literatura é que o traçado das linhas projetadas é uma sequência de nós no grafo simplificado da estrutura viária de uma região, ou seja, ainda falta a etapa de definição das vias de forma detalhada e do sequenciamento de pontos de parada que uma linha precisa para ter sua operação iniciada em um sistema real. Nesse sentido, esta pesquisa apresenta uma etapa final de detalhamento do sequenciamento de nós às vias do sistema real. Inclusive constrói-se a rede projetada no formato *General Transit Feed System* (GTFS), que possibilita buscar como fazer um caminho dentro da rede usando softwares de código aberto já existentes.

Nesta pesquisa a análise de sensibilidade apresentada contribui à literatura com discussões a respeito não apenas da necessidade de se chegar às soluções de compromisso quanto a custos de usuários e operadores, mas também traz o debate necessário com relação a aspectos como demanda não-atendida pela rede, extensão média das linhas, número médio de transferências assim como as diversas escolhas tomadas para o projeto da rede (número de linhas, extensão máxima das linhas, desvio máximo de tempo de viagem, número de terminais, demanda de diferentes dias) se refletem nestas variáveis. Assim, esta pesquisa apresenta avanços para a literatura científica sob diferentes aspectos do problema do projeto de redes de transporte público.

4 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA E MODELAGEM MATEMÁTICA

Neste capítulo é apresentada a caracterização do problema tratado nessa pesquisa que, conforme classificação apresentada anteriormente na seção 3.2, se enquadra na categoria de TNDFSP (*transit network design and frequency setting problem*), isto é, o problema do projeto da rede de transporte público e determinação das frequências, onde se procura definir o traçado das rotas de transporte público na rede e suas respectivas frequências de operação. Isso contempla a delimitação do escopo e a modelagem matemática do TNDFSP.

Projetar a rede consiste em determinar um conjunto de rotas (ou linhas) que formam uma rede de transporte público eficiente, atendendo às demandas de transporte tal que a soma dos tempos de viagem e de transferências de todos os usuários seja mínima, assim como a frota necessária para operá-la. Rotas de transporte público utilizam a rede viária existente e permitem o embarque e o desembarque de passageiros em pontos de parada pré-definidos e conhecidos a priori.

A segunda parte, de determinação das frequências de operação, estabelece o número de partidas que são realizadas por cada uma das linhas em um intervalo de tempo, assim como define a sua capacidade máxima. Esta parte requer a alocação da demanda às rotas, sendo então possível dimensionar as frequências e calcular a frota necessária para operação do sistema.

Se por um lado maiores frequências de operação dos serviços afetam diretamente os custos dos operadores, uma vez que elas diretamente influenciam a frota total necessária, por outro lado frequências maiores também contribuem para um sistema de transporte público de melhor qualidade, já que os passageiros esperam menos tempo para embarcar. Objetivos conflitantes de custos de usuários (redução do tempo de viagem, do tempo de espera, do número de transferências, demanda não atendida) e operadores (frota, extensão das linhas, número de linhas) tornam o TNDFSP multiobjetivo por natureza.

Assim, não há uma única solução ótima, mas um conjunto de soluções conhecidas como soluções ótimas de Pareto (TALBI, 2009), que representam as soluções que melhor atendem tanto aos operadores como aos usuários. O objetivo principal do TNDFSP é encontrar um conjunto de soluções que promova: (i) do ponto de vista dos usuários, tempos totais de viagem menores e a menor quantidade possível de transferências para completar as viagens, maximizando as viagens diretas; (ii) para os operadores, operar a rede com menos veículos.

Nesta tese, conforme mencionado anteriormente, objetiva-se projetar redes estruturais de transporte público por ônibus. A delimitação do escopo inclui as seguintes especificações, alinhada com o escopo do problema dos trabalhos recentes da literatura científica nesta área de pesquisa do PRTP:

- A área urbana para aplicação da metodologia já possui ou pretende implantar uma *infraestrutura de sistema tronco-alimentado de transporte público* (terminais de transporte e vias com priorização para transporte público por ônibus);
- A rede estrutural de transporte público é formada por *linhas que conectam terminais de transporte*, não sendo possível o início/término de linhas em nós localizados que não sejam terminais de transporte (nós não-terminais são apenas de passagem);
- *Os terminais de transporte a serem utilizados na otimização da rede e suas respectivas localizações são dados de entrada*; ou seja, esta pesquisa não contempla o problema de determinação do número e da localização ótima dos terminais nem a definição de quais terminais utilizar dentre um conjunto. O número mínimo de terminais de entrada é 2, sem um limite máximo especificado de terminais. A metodologia foi desenvolvida visando redes com até dezenas de terminais de onde iniciam, por onde passam e onde terminam as linhas estruturais da rede que se busca projetar;
- *Não é considerada a capacidade física e operacional da infraestrutura*: dos terminais, vias e pontos de parada. Não há restrição, portanto, do número de linhas nos terminais. Esta verificação deverá ser realizada após a proposta de rede otimizada quanto à operacionalidade final da rede com as frequências escolhidas. Esta hipótese foi considerada para reduzir a complexidade do modelo. Para redes com vários terminais e uma demanda proporcionalmente baixa, a capacidade em termos de número de linhas e partidas por hora não chega a ser um gargalo importante;
- *Existe apenas um tipo/tamanho dos veículos*, para as linhas estruturais que ligam os terminais. Na prática, sistemas estruturais mais eficientes trabalham com um ou dois tamanhos de veículos. Por exemplo nos BRTs chineses, usualmente emprega-se veículos articulados de 12 ou 18 metros (DENG; MA; WANG, 2013). No sistema Transmilenio, em Bogotá (Colômbia), a operação inicial das linhas troncais adotou apenas veículos articulados com capacidade de 160 passageiros

(SANDOVAL; HIDALGO, 2004), sendo introduzidos biarticulados posteriormente. Ademais, a inclusão de veículos diferentes torna o problema de otimização mais complexo. Conforme apontado na revisão da literatura na subseção 3.5.4, poucos trabalhos consideram o tamanho do veículo, ainda com abordagens incipientes;

- *Não são permitidas linhas circulares*, ou seja, não é possível incluir nós repetidos nas linhas. Esta especificação do modelo é adotada para reduzir a complexidade da alocação. Além disso, rotas que passam no mesmo ponto de parada duas vezes trazem confusão aos usuários, pois após o primeiro atendimento a rota ainda percorrerá outras vias e voltará ao mesmo ponto, fazendo com que ocorra um tempo de viagem excessivo e desnecessário. Portanto, Chakroborty (2003) destaca que as rotas não devem voltar (*backtrack*), para evitar estes problemas na modelagem e no atendimento ao usuário. Todos os nós devem ser únicos em cada linha e sentido de operação;
- *O tempo de viagem na rede é fixo*. A influência do volume de veículos e das características operacionais das vias não é considerada. O projeto da rede é realizado para o período de pico de interesse do projeto, portanto é razoável admitir tempos de viagem fixos, por se tratar de um período curto de tempo. Esta hipótese foi adotada também para reduzir a complexidade do problema de otimização, conforme apresentado na subseção 3.7.3;
- *A demanda de viagens é fixa*. Não se representa atração da demanda em função da qualidade do serviço de transporte público comparativamente a outros modos, como transporte individual por automóvel. A demanda considerada no projeto de rede é do horário de pico do período de interesse do projeto;
- *Os custos dos usuários considerados correspondem ao tempo de viagem dentro do veículo, tempo de espera para embarque e penalidades de tempo associadas às transferências*. Esta representação desconsidera: custos financeiros associados ao pagamento de tarifas para acesso ao sistema de transporte (pelo fato do foco ser no projeto da rede em si, e considerando que a maioria dos sistemas de transporte público brasileiros opera com tarifa única), restrições temporais de integração tarifária, tempos de acesso e egresso por caminhada da origem ao destino final, desconforto associado a taxas de lotação elevadas e outros fatores

subjetivos, como segurança e conforto dos veículos. Esses fatores não são considerados de forma a reduzir a complexidade do problema de otimização.

- *Os custos dos operadores são representados pela frota total necessária para operar o sistema.* Esta representação não considera diferenças de custos em função de itinerários com traçados mais sinuosos, em trechos de aclave/declive, e/ou quilometragem percorrida. Considera-se que todos os veículos estão em operação contínua durante todo o período e não há movimentação entre as garagens até os pontos de início e fim;
- *Os pontos de parada são pré-existent e são representados de forma agregada no modelo do sistema viário através de nós.* Os pontos de embarque e desembarque ao sistema de transporte público são realizados nos nós do sistema viário utilizado. A metodologia de agregação proposta nesta pesquisa é apresentada na seção 5.3;

A delimitação do escopo apresentada, embora simplifique o sistema real, alinha-se com as formulações adotadas na literatura, conforme apresentado no Capítulo 3. No entanto, a maioria das pesquisas analisadas da literatura científica utilizam-se de uma simplificação adicional que as linhas podem iniciar e terminar seu itinerário em qualquer nó do sistema viário simplificado, que não corresponde à estrutura de sistemas de transporte público tronco-alimentados nem mesmo à operação de sistemas de transporte público por ônibus reais. Esta hipótese impossibilita a aplicação das metodologias desenvolvidas pelos autores para redes de maior tamanho.

No PRTP, os pontos iniciais e finais devem se localizar em pontos com infraestrutura adequada, inclusive com área de manobra e locais próprios para o embarque e desembarque de passageiros. Portanto, a consideração de nós apenas de passagem é importante.

Esta tese avança e contribui na área de pesquisa especificamente com a proposta de projeto de redes estruturais de transporte público para sistemas tronco-alimentados, onde as linhas se originam e destinam a terminais, objetivando a aplicação da metodologia proposta à sistemas reais de maior escala com terminais de transporte pré-estabelecidos. Na literatura não se encontrou tal aplicação e proximidade com a escala necessária à mudança de sistemas estruturais de transporte por ônibus reais, constituindo uma contribuição desta tese ao conhecimento científico.

Adicionalmente, uma contribuição à literatura se refere ao tamanho do problema resolvido. Observou-se este *gap* nos artigos científicos em que a maioria das instâncias publicadas e utilizadas para testes dos algoritmos continham dezenas de nós. Uma das maiores instâncias divulgadas na literatura é a *Mumford3* com 127 nós e 425 links, objeto de aplicação das metodologias mais recentes (AHMED; MUMFORD; KHEIRI, 2018; BUBA; LEE, 2018; NAYEEM; ISLAM; YAO, 2019). A metodologia apresentada nesta tese obtém bons resultados para um estudo de caso de 343 nós, sendo dentre eles 32 terminais e 1202 links, mais do dobro da escala de *Mumford3* se considerado o número total de nós da rede.

4.1 Modelo Matemático

De forma geral, um sistema de transporte público pode ser representado através de uma rede composta de nós (*nodes*), arcos (*links*) e rotas (*routes*) ou linhas. Considere um grafo conexo direcionado $G = \{N, A\}$, que consiste em um número finito de N nós e A arestas que conectam pares de nós.

Um grafo corresponde a um conjunto de nós e arestas. Um grafo dito conexo é aquele em que a partir de qualquer nó é possível atingir qualquer outro nó através de, no mínimo, um caminho (sequência de arestas no grafo). O grafo denominado direcionado é aquele em que todas as arestas são arcos, ou seja, são pares ordenados de nós distintos, onde a orientação é importante.

A rede representa, neste trabalho, o conjunto de linhas de ônibus resultantes da otimização formando uma infraestrutura de serviços de transporte público oferecidos à população, associado aos componentes do sistema viário, os nós e os *links*. Os nós representam pontos de parada agregados e os terminais. Já os *links* representam as ligações viárias com orientações entre os nós, com seu respectivo tempo de viagem fixo.

Os dados de entrada que são geralmente utilizados nos artigos foram descritos anteriormente no Capítulo 3, seção 3.7. Para o presente trabalho, foi considerada a matriz OD de demanda como fixa, ou seja, que não muda com relação à qualidade do serviço nem estimula novas viagens. A matriz de tempos de viagem entre os nós (de cada *link*) também é dado de entrada e fixa a partir de uma velocidade fixa, sem mudar com um eventual maior congestionamento da rede em decorrência de uma maior frota circulando. A frota de veículos é homogênea em termos de oferta e capacidade de transporte de passageiros.

O modelo matemático proposto neste trabalho parte de um conjunto de rotas candidatas já definido, alinhado com a estrutura metodológica apresentada anteriormente na subseção 3.8.1. O banco de rotas contém apenas linhas que iniciam e terminam nos terminais.

Esse conjunto de rotas candidatas é criado em uma etapa do método de solução detalhado mais adiante no Capítulo 5. Neste procedimento de geração de rotas, não é possível assegurar que serão incluídas todas as rotas que estariam em soluções na envoltória ótima do problema, já que o número de possibilidades de trajetos entre pares de terminais podem chegar a dezenas de milhares ao se considerar que as linhas podem desviar um percentual do trajeto mais rápido para atender mais demanda. Dessa forma, adota-se um procedimento de forma a incluir as linhas potencialmente promissoras a fazerem parte de uma rede otimizada.

A ideia na qual se baseia a criação de um banco de rotas é para formar um grande conjunto de rotas de ônibus possíveis na rede viável que sejam atrativas aos usuários, de forma que ofereçam tempos de viagem tão próximos quanto ao mais rápido de acordo com o par origem-destino em questão. Baseado nesse pressuposto, qualquer rota que seja usada em uma solução será uma opção de transporte eficiente para todos os pares origens-destino que ela conecta. Com base nessa explicação, o modelo matemático proposto não gera a solução ótima caso o conjunto de linhas seja pequeno, insuficiente ou inadequado de alguma forma. Destaca-se, portanto, a importância do algoritmo de geração de rotas candidatas apresentado no Capítulo 5.

Para o modelo matemático, todas as rotas candidatas poderiam ser geradas considerando que elas atendam as restrições da Tabela 4.1. Esta geração de todas as rotas seria possível uma vez estabelecidos um limite no desvio máximo do tempo de viagem nos trajetos entre dois terminais, um limite na extensão das rotas e o atendimento à restrição de que não sejam aceitas linhas com nós repetidos. No entanto, a geração de todas as rotas candidatas possíveis tenderia a gerar uma intratabilidade computacional para redes maiores.

A modelagem se utiliza explicitamente de um conjunto de rotas candidatas (B) conhecido e definido *a priori* (B) gerado por um algoritmo de geração de banco de rotas que apenas considera linhas iniciando e terminando em nós de terminais. Este algoritmo precisa restringir a criação das rotas potenciais à estes nós já que o modelo matemático não diferencia os tipos de nós na formulação. Quanto ao número de linhas na solução, ele deve estar entre um valor mínimo e máximo previamente definido.

Este modelo matemático proposto se baseia e é uma adaptação das formulações apresentadas em Fan e Machemehl (2006), Cipriani (2012), Arbex (2014), Amiripour (2015) e Buba e Lee (2018).

Parâmetros:

N = conjunto de nós na rede

d_{ij} = demanda total de passageiros entre os nós $i, j \in N$

t_{ij} = tempo de viagem do link entre os nós i e j

B = banco de rotas candidatas definidas a priori, de tamanho M

NR_{min}, NR_{max} = número mínimo e máximo de rotas permitido na solução

E_{min}, E_{max} = extensão mínima e máxima permitida para as rotas

$f_{r\ min}, f_{r\ max}$ = frequência mínima e máxima das rotas ($\frac{1}{f_r} = h$, headway (intervalo))

FC_{max} = fator de carregamento (load factor) máximo para qualquer rota

CAP = capacidade de passageiros sentados em um ônibus operando na rede

FT_{max} = frota máxima disponível para operação na rede

Variáveis de decisão:

r_m = igual a 1 se a rota m faz parte da solução; zero caso contrário,

$m = 1, 2, \dots, M$

f_r^m = frequência de operação da rota m

Funções Objetivo:

$$\min z_1 = d_{ij} \cdot \sum_{i,j \in N} TV_{ij} + PE \cdot d_{ij} \cdot \sum_{i,j \in N} TE_{ij} + PT \cdot \sum_{i \in N} TR_i \quad (4.1)$$

$$\min z_2 = \sum_{k \in R} FR_k \quad (4.2)$$

Restrições:

$$f_{r_{min}} \leq f_r^m \leq f_{r_{max}}, \quad f_r^m > 0, \quad r_m \in R \quad (\text{viabilidade das frequências}) \quad (4.3)$$

$$FC_{r_m} \leq FC_{max}, \quad r_m \in R \quad (\text{restrição da lotação máxima}) \quad (4.4)$$

$$Q_{r_m}^{max} \leq FC \cdot CAP \cdot f_{r_m}, \quad r_m \in R \quad (\text{restrição da capacidade máxima}) \quad (4.5)$$

$$\sum_{k \in R} FR_k \leq FR_{max} \quad (\text{frota disponível}) \quad (4.6)$$

$$E_{min} \leq E_{r_m} \leq E_{max}, \quad r_m \in NR \quad (\text{extensão da rota}) \quad (4.7)$$

$$NR_{min} \leq NR \leq NR_{max} \quad (\text{número de rotas}) \quad (4.8)$$

Onde:

M = número de rotas no banco de rotas da rede de transporte público

NR = número de rotas na solução da rede de transporte público

TV_{ij} = tempo de viagem apenas dentro do(s) veículo(s) para a demanda d_{ij}

TE_{ij} = tempo total de espera dispendido pela demanda d_{ij}

TR_i = número total de transferências realizadas no nó i

R = solução da rede de transporte público, composta pelas rotas selecionadas do banco de rotas B

PE = penalidade da percepção do tempo de espera em relação a 1 minuto de tempo de viagem dentro do veículo

PT = penalidade de tempo adicional relativa à realização de transferências

FR_k = frota total da rota k operando na rede de transporte público

FR_{max} = frota máxima disponível para operação na rede

$Q_{r_m}^{max}$ = carregamento de passageiros no trecho crítico da rota (segmento entre dois nós de maior demanda)

FC = fator de carregamento

(razão entre capacidade total do veículo e passageiros sentados)

4.1.1 Funções Objetivo

As funções objetivo (4.1) e (4.2) procuram maximizar o bem-estar social promovido pelo sistema de transportes, equilibrando tanto a minimização dos custos dos operadores como dos

custos dos usuários. Tendo em vista tratar-se de um problema multiobjetivo, a função objetivo adotada considera duas parcelas, z_1 e z_2 , representando esses dois objetivos mais importantes (usuários e operadores).

A função objetivo z_1 compreende os custos dos usuários, representado pela soma do tempo total de viagem dentro dos veículos, do tempo de espera total para toda a demanda ponderado por um fator de percepção e da penalidade de tempo percebido associada às transferências necessárias na rede. Essa soma representa, de fato, os custos generalizados de um passageiro. A função objetivo z_1 corresponde, logo, à soma dos custos generalizados dos usuários de acordo com o escopo adotado para este custo.

A função objetivo z_2 está relacionada aos custos dos operadores, que são os custos de operação dos veículos necessários para o funcionamento da rede proposta. Estes custos se compõem de custos fixos (em função do número de veículos) e variáveis (em função das distâncias percorridas e tempo de operação). Nesta pesquisa, os custos dos operadores são representados pelo número de veículos necessários para operação das linhas com as frequências adotadas por ser a maior parcela do custo dos operadores.

4.1.2 Restrições

Resumidamente no quadro a seguir estão descritos como foram tratadas neste trabalho as restrições apresentadas na seção 3.5. Ao longo desta seção são detalhadas as equações adotadas para atender às restrições do PRTP.

A primeira das Restrições consideradas (4.3) está ligada a viabilidade de operação das frequências, sendo utilizados limites máximos e mínimos de frequências de operação. Valores menores de partidas por hora não serão considerados no modelo (*headway* de 20 minutos ou mais, por exemplo), pois diminuem fortemente a atratividade do transporte público urbano, uma vez que geram uma menor confiabilidade dos serviços devido à maior variação do tempo de viagem total para o usuário. Isto ocorre pois, considerando chegadas aleatórias aos pontos, caso um usuário chegue assim que um ônibus realizou atendimento em um ponto, este usuário terá de esperar pelo próximo veículo, aumentando o tempo total de viagem em igual valor ao *headway* da linha. Assim, o tempo total de viagem tem uma maior variabilidade. Por exemplo, na cidade de São Paulo, a variabilidade do tempo de viagem é diferente nas regiões, fazendo com que uma parcela dos usuários tenha que reservar mais tempo a seu trajeto caso queira chegar no horário planejado com segurança na maior parte das vezes (ARBEX; ALVES; GIANNOTTI, 2016).

A segunda Restrição (4.4) refere-se ao limite de lotação dos veículos: o fator de carregamento FC (*“load factor”*) é o quociente entre o total de passageiros no veículo e o número de passageiros sentados. Para todas as linhas, o maior fator de carregamento ao longo do itinerário não deverá ultrapassar o fator de carregamento máximo. Optou-se por utilizar o fator de carregamento ao invés de passageiros/m² para reproduzir o mesmo conceito como parâmetro adotado em trabalhos similares de PRTP (BAAJ; MAHMASSANI, 1991; AFANDIZADEH; KHAKSAR; KALANTARI, 2013).

Tabela 4.1: Atendimento às restrições

Restrição (Número da subseção)	Descrição	Atendimento
3.3.1	Frequências e Intervalos	Atendido pela Equação 4.3
3.3.2	Lotação	Atendido pela Equação 4.4
3.3.3	Capacidade	Atendido pela Equação 4.5
3.3.4	Frota	Atendido pela Equação 4.6
3.3.5	Extensão das Rotas	Atendido pela Equação 4.7
3.3.6	Linearidade das Rotas e Tempos de Viagem	Atendido através do método que cria o banco/conjunto de rotas candidatas B
3.3.7	Atendimento da Demanda	Atendida no método, que verifica a viabilidade da realização de todos os pares origem-destino entre terminais utilizando até 3 linhas (2 transferências)
3.3.8	Número de Linhas	Atendido pela Equação 4.8
3.3.9	Transferências	Busca-se minimizar os custos das transferências na função objetivo z_1 da Equação 4.1
3.3.10	Área de Cobertura e Espaçamento de pontos de parada	Esta tese não busca modificar nem otimizar a distribuição dos pontos de parada. Serão considerados os já existentes na rede
3.3.11	Rotas e Infraestrutura existente	Este trabalho irá propor uma rede estrutural nova
3.3.12	Nós únicos (viabilidade da rede)	Atendido através do método que cria o banco/conjunto de rotas candidatas B
3.3.13	Atendimento dos nós (viabilidade da rede)	Para cada solução, será verificado se todos os terminais são atendidos por ao menos uma rota.
3.3.14	Rotas Conectadas (viabilidade da rede)	Para cada solução, será verificado se as rotas estão todas conectadas, para evitar a situação apresentada na Figura 4.1.
3.3.15	Rotas Únicas (viabilidade da rede)	Atendido através da metodologia, que verifica que todas as rotas são únicas na rede

Fonte: Próprio autor.

A terceira Restrição (4.5) refere-se à capacidade máxima das linhas. O carregamento estimado para o trecho crítico das linhas (onde ocorre o carregamento máximo de passageiros/h/sentido) deverá ser menor que a capacidade de projeto dos veículos multiplicada pela frequência de operação da linha. A capacidade de projeto é o fator de carregamento multiplicado pelos assentos disponíveis no veículo.

A quarta Restrição (4.6) corresponde à frota disponível para operação na rede. Esta restrição corresponde à dificuldade financeira de aquisição de muitos veículos novos para operação de um sistema de transporte. Além disso, esta restrição auxilia a busca, permitindo o descarte de soluções com frota maior que o máximo especificado nesta restrição.

Figura 4.1: Rede inviável pois as rotas não estão conectadas. Os nós que compõem a rota em verde estão isolados dos demais nós da rede.

Fonte: Arbex (2014).

A quinta Restrição (4.7) refere-se à extensão da rota, que deve se enquadrar entre um valor máximo e mínimo previamente escolhido por questões operacionais (subseção 3.5.5). Esta limitação pode ser representada por número de nós, tempo de viagem e/ou distância total percorrida. Neste trabalho é considerada a distância em quilômetros como limite de extensão das rotas.

A sexta Restrição (4.8) está relacionada ao número de linhas da rede. O modelo pressupõe que um número mínimo e máximo de linhas na rede seja dado de entrada. A razão pela limitação do número de linhas da rede é descrita na subseção 3.5.8. No caso do transporte público urbano,

restringir o número de linhas é importante para facilitar a informação ao usuário e permitir melhor gerenciamento dos serviços pelos operadores e planejadores.

A rede de transporte projetada deve também ser viável. Devido à complexidade de formular matematicamente essas restrições adicionais, como apontado por Chakroborty (2003) e Chew e Lee (2013), elas não foram incorporadas ao modelo matemático. Caso uma delas não seja atendida a solução como um todo é inviável. O atendimento a essas restrições de formação de rede viável é detalhado mais adiante no Capítulo 5. Elas foram destacadas e explicadas nos últimos itens da seção 3.5 e são:

(4.9) Os nós devem ser únicos em cada uma das rotas, mas podem ser repetidos na rede;

(4.10) Todos os nós da rede são atendidos por ao menos uma rota: nesta pesquisa de redes estruturais, esta restrição é adaptada para “todos os *terminais* da rede são atendidos por ao menos uma rota”;

(4.11) As rotas da rede devem estar conectadas entre si e

(4.12) A mesma rota não pode aparecer repetida em uma rede, ou seja, não pode ser selecionada mais de uma vez, já que r_m é um vetor binário, indicando se a linha está inclusa na solução ou não.

4.1.3 Variáveis de Decisão

As variáveis de decisão do modelo são: a variável indicativa se a rota foi adicionada ou não à rede e as frequências adotadas. O traçado das diferentes rotas dentro da rede considerada se refere a quais nós serão atendidos e em que ordem. As rotas operam no sentido de ida e de volta. A frequência é o número de partidas por intervalo de tempo.

A seguir, o Capítulo 5 apresenta o método de solução proposto.

5 MÉTODO DE SOLUÇÃO

Os métodos de solução propostos na literatura científica para o problema do projeto de redes de transporte público (PRTP) podem ser classificados em *geração e configuração de rotas* e *construção e melhoria de rotas*, conforme apresentado anteriormente na seção 3.8. A metodologia baseada em geração e configuração de rotas cria um conjunto de rotas candidatas a fazerem parte da rede com base em critérios previamente definidos, e projeta as redes através da combinação de linhas desse conjunto. Já na abordagem de construção e melhoria de rotas, uma solução é determinada através de métodos heurísticos, e as linhas que a compõem recebem modificações ao longo da busca, como adição ou remoção de nós do itinerário.

Nesta pesquisa é proposta uma metodologia de projeto de redes estruturais de transporte público por ônibus baseada na geração e configuração de rotas. Uma vez gerado um conjunto de rotas candidatas, as soluções são determinadas por um subconjunto das mesmas. As redes são avaliadas com relação às funções objetivo propostas pelo modelo matemático apresentado no Capítulo 4 e uma busca por melhores soluções é realizada através da meta-heurística Algoritmos Genéticos (AG), que trabalha com uma população de soluções para o problema.

Em virtude do grande número de possibilidades de rotas e redes possíveis para uma estrutura de rede tronco-alimentada em uma área urbana, esta pesquisa propõe um método em 4 níveis de agregação, aplicados sequencialmente. A seleção de linhas a partir de um banco de rotas é um problema complexo de natureza combinatória. O número de possibilidades de soluções, por exemplo para um banco de rotas com R linhas e de n_{min} a n_{max} linhas nas soluções é dado pela Equação 5.1, crescendo exponencialmente com o tamanho do banco de rotas. Para um banco de rotas com 1000 linhas, e soluções de 20 a 50 linhas na rede o número está na ordem de grandeza de 10^{85} .

$$N_{sols} = \sum_{n_{linhas}=n_{min}}^{n_{max}} C(R, n_{linhas}) = \sum_{n_{linhas}=n_{min}}^{n_{max}} \frac{R!}{n_{linhas}! (R - n_{linhas})!} \quad (5.1)$$

Os quatro níveis propostos operam com diferentes agregações com relação à representação da oferta e da demanda. A estrutura geral do método é detalhada a seguir.

5.1 Estrutura Geral do Método

A estrutura geral do método proposto está apresentada na Figura 5.1. O método recebe como dado de entrada uma representação simplificada da rede viária para projeto das linhas estruturais, dados de bilhetagem eletrônica, registros de localização de GPS dos veículos, terminais disponíveis e parâmetros necessários ao modelo matemático. Em seguida, os dados de bilhetagem eletrônica são processados para a estimação da matriz de origem-destino (OD) das viagens entre pontos de parada do sistema. A partir da matriz OD entre pontos, é feita uma agregação da demanda para os nós da rede viária estrutural, que por sua vez são agregados aos terminais disponíveis para operação.

Essa matriz de viagens entre as regiões dos terminais é usada como dado de entrada ao *Nível 1* do projeto da rede, que determina, para todas as soluções, o número de linhas e a sequência de terminais atendidos por cada linha com base num conjunto de sequências de terminais previamente criados (Banco Estrutural). Para todas as soluções avaliadas durante a busca é feita a alocação da demanda e um pré-dimensionamento das frequências de modo a possibilitar o cálculo estimado dos custos generalizados dos usuários e da frota necessária para operar cada rede.

Por ser um problema multiobjetivo, o método busca soluções que minimizem tanto a frota como o custo generalizado total (soma do custo generalizado de todos os usuários). Como resultado do *Nível 1* obtém-se uma dispersão das soluções encontradas com relação às funções objetivo custo generalizado total e frota com a aplicação da meta-heurística Algoritmos Genéticos, dentre as quais são filtradas aquelas não-dominadas por outras soluções para continuar a busca dos itinerários no *Nível 2*.

No *Nível 2* é realizada a definição do trajeto entre terminais de todas as linhas de cada solução, ou seja, onde antes apenas a sequência dos terminais atendidos era determinada, agora uma sequência de nós atendidos entre eles é definida. Esta etapa utiliza um conjunto de itinerários candidatos (sequência de nós do sistema viário estrutural) entre cada par de terminais existentes na rede (Banco Itinerários). Em virtude do tempo elevado de processamento para a alocação da demanda, no *Nível 2* são usados dois indicadores no lugar das funções objetivo custo generalizado total e frota: número de transferências e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural. Estes indicadores potencializam a busca por melhores soluções devido ao menor tempo de processamento necessário ao longo da busca. No *Nível 2*, também é aplicada a meta-heurística Algoritmos Genéticos na busca pelas melhores soluções. Igualmente ao *Nível*

1, como resultado obtém-se uma dispersão das soluções quanto aos indicadores mencionados (transferências e percentual da demanda não-atendida), dentre as quais são filtradas aquelas não-dominadas por outras para o Nível 3.

No *Nível 3* é realizado, para cada solução, o cálculo final da frequência de cada uma das linhas. Para tal, é feita a alocação da demanda à rede estrutural através do software EMME 4.3 (INRO, 2019), que distribui a demanda nas linhas atrativas aos usuários para as viagens entre cada par OD. A alocação possibilita estimar o carregamento crítico das linhas, usado no dimensionamento das frequências. Como a mudança das frequências altera o tempo de espera dos usuários e, conseqüentemente, altera quais as linhas mais e menos atrativas para suas viagens, o processo é iterativo.

Ao final, obtém-se os valores do custo generalizado total, frota, número de transferências e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural. Pelo fato de uma parcela dos nós do sistema viário não serem atendidos por nenhuma linha (já que não há obrigatoriedade de atendimento de todos os nós, mas sim de todos os terminais), uma parcela da demanda não será atendida pelas linhas estruturais, sendo atendidas pelas linhas alimentadores (ou linhas locais), que atendem aos bairros.

Como a rede estrutural faz parte de um sistema tronco-alimentado, a avaliação conjunta da operação da rede estrutural com as linhas alimentadoras do sistema é a etapa final do método no Nível 4.

Finalmente, no *Nível 4* é feita uma avaliação de indicadores de algumas soluções de rede estrutural operando em conjunto com as linhas locais, ou seja, são avaliados os trajetos necessários para os usuários desde o ponto de parada estimado que ocorreu o início da sua viagem até o ponto de parada estimado onde a viagem foi finalizada. Assim, é possível analisar se os indicadores calculados em uma rede agregada se mantêm mesmo após a desagregação dos itinerários projetados utilizando *links* simplificados em sequenciamento de pontos de parada.

Para tanto, os itinerários entre nós estruturais definidos no Nível 2 precisam ser detalhados para sequência de pontos de parada. Isto é, neste nível define-se uma rota através da sequência de nós atendidos em uma representação simplificada do sistema viário real. No entanto, uma rota para ser implantada na prática precisa percorrer uma sequência definida de vias e atender os pontos de parada localizados nestas vias. De forma a transformar a sequência de nós da linha em uma estrutura implementável em um sistema real, esta adaptação para sequência de pontos de parada é feita.

Figura 5.1: Estrutura Geral do método de solução proposto para o projeto da rede estrutural.

Fonte: Próprio autor.

No Nível 4, idealmente deveriam ser avaliadas novamente as funções objetivo custo generalizado e frota total, porém isso exigiria um esforço de modelagem de uma rede de simulação muito mais detalhada que considerasse o itinerário de todas as linhas alimentadoras do sistema estrutural, que está além do escopo deste trabalho. Dessa forma, indicadores de tempo médio de viagem e número de transferências são calculados para algumas soluções conjuntas (rede estrutural e rede de linhas locais já existentes) de forma a apresentar ganhos globais com a aplicação da metodologia desenvolvida neste trabalho. Além disso, a literatura apresenta este gap de como transformar as soluções que são projetadas em sistemas viários simplificados para o sistema real, já que os autores não consideram estas questões práticas de implementação das linhas no sistema viário real.

Observa-se que o método é baseado em uma solução em etapas que buscam aumentar a tratabilidade do problema de projeto de redes estruturais de transporte público, ou seja, apresenta uma estratégia de redução da complexidade para redes maiores. Ao agregar a demanda e a oferta entre terminais no Nível 1, o número de possibilidades de linhas reduz muito por não considerar a parcela dos itinerários entre os terminais atendidos. Nas seções a seguir são detalhadas as etapas da metodologia.

5.2 Matriz Origem-Destino a partir de Dados de Bilhetagem Eletrônica

Conforme apresentado na subseção 3.7.1, os trabalhos de PRTP encontrados na literatura não discorrem sobre a origem ou como são obtidas as matrizes origem-destino utilizadas em projetos de rede de transporte coletivo. Neste sentido, esta seção busca descrever de forma resumida a utilização de dados de bilhetagem eletrônica a fim de extrair indicadores de uso do sistema de transporte público, dentre os quais a matriz origem-destino de viagens.

A matriz origem-destino representa o volume de viagens entre uma subdivisão espacial (usualmente entre zonas de tráfego) da região de estudo. Tradicionalmente podem ser obtidas por coleta de dados do tipo entrevistas domiciliares: os dados de viagens coletados são expandidos e utilizados para gerar modelos de distribuição de viagens que permitem obter matrizes de viagens modeladas.

No entanto, as zonas de tráfego costumam compreender áreas grandes, ou seja, a precisão espacial das informações da matriz OD é baixa e muito agregada. De modo a ser utilizada como dado de entrada no PRTP, é necessário aumentar a resolução espacial da matriz OD. Isso se deve ao fato que o projeto de redes de transporte público, principalmente por ônibus, parte do pressuposto que o usuário avalia previamente tanto as distâncias do seu local de origem aos locais de acesso do sistema (pontos de parada) como as linhas disponíveis para a realização da viagem. Numa representação de matriz OD tradicional entre zonas de tráfego de grande área, todas as viagens iniciadas em uma zona são simplificadas para iniciarem em seu centroide. Dessa forma, tanto as distâncias a serem percorridas como as linhas disponíveis nas proximidades do centroide da zona são diferentes daquelas se o usuário estivesse saindo da sua origem exata dentro da zona.

De forma a atender a esta necessidade, esta etapa da metodologia estima uma matriz origem-destino de viagens entre pontos de parada. Embora a parcela de caminhada da origem e destino final aos pontos de parada do sistema de transporte público seja desconsiderada, a

matriz resultante possui uma desagregação espacial maior e uma amostragem maior quando comparada com matrizes OD entre zonas de tráfego obtidas de maneira tradicional.

Os sistemas de bilhetagem eletrônica vêm sendo cada vez mais adotados como forma de pagamento nos sistemas de transporte público de todo o mundo em função da maior facilidade de gestão da arrecadação do sistema e operacionalização de políticas tarifárias (PELLETIER; TRÉPANIER; MORENCY, 2011). São utilizados cartões que armazenam eletronicamente o saldo que pode ser utilizado no sistema.

A estrutura geral do processamento dos dados de bilhetagem eletrônica proposto neste trabalho está apresentada na Figura 5.2. O processamento inicia com a Entrada de Dados, onde são lidos e tratados os arquivos referentes às transações registradas no sistema de bilhetagem eletrônica, registros de localização dos veículos pela base de GPS e dados do sistema de transporte público (pontos de parada, sequenciamento dos pontos de parada das linhas, frequências) no formato *General Transit Feed System*, ou *GTFS* (GOOGLE, 2019).

Em seguida, através da busca na base de localização dos veículos é feita a atribuição da localização mais provável onde ocorreram as transações. Posteriormente é realizada a estimativa do ponto de desembarque. Para tal, parte-se da hipótese, alinhada com a literatura desta área de pesquisa (TRÉPANIER; TRANCHANT; CHAPLEAU, 2007; MUNIZAGA; PALMA, 2012), que o destino de cada embarque é próximo ao local da transação seguinte do mesmo cartão. Nesta etapa, são aplicados critérios de verificação de validade da transação para esta ser considerada ou não para estimativa das viagens realizadas por aquele cartão.

Na sequência, é determinado o tempo de viagem entre os pontos estimados de embarque e desembarque, da seguinte forma: a partir das velocidades médias entre os pontos de parada por faixa horária para o caso de transporte por ônibus e, para serviços baseados em trilhos, a partir dos tempos de viagem programados.

Em seguida são avaliadas as viagens realizadas por cada cartão através do método de encadeamento de transações (*trip chaining*), que agrupa transações que representam uma única viagem caso o tempo entre o desembarque e o embarque seguinte seja menor que um valor pré-estabelecido a priori (por exemplo, 30 minutos). Este procedimento é aplicado a todos os cartões da base, e uma verificação de validade de viagens é realizado. Finalmente, obtém-se a matriz origem-destino de viagens estimada a partir da bilhetagem eletrônica e o fator de expansão associado às viagens calculado considerando as perdas de informações após a verificação de validade das viagens.

A utilização de bilhetagem eletrônica como fonte de dados para estimação de matrizes origem-destino de viagens é vantajosa pois pode ser aplicada a quaisquer períodos do dia e/ou dias da semana. Por exemplo em domingos e feriados, assim como para períodos ou horários específicos como as madrugadas.

Detalhes adicionais acerca da metodologia utilizada para transformação dos dados de bilhetagem eletrônica e registros de localização por GPS dos veículos em uma matriz origem-destino de viagens entre pontos de parada são apresentados no APÊNDICE C.

Figura 5.2: Fluxograma do processamento de dados de bilhetagem eletrônica e GPS dos veículos.

Fonte: Próprio autor.

5.3 Representação da Oferta: Sistema Viário Estrutural

O itinerário das linhas estruturais compreende a sequência de vias que as linhas percorrem durante o serviço de transporte, parando para efetuar embarques e desembarques de passageiros em pontos de parada existentes nessas vias. Idealmente, todo sistema viário adequado à circulação de ônibus deveria ser considerado no PRTP. Entretanto, a modelagem de todas as vias urbanas não é recomendada devido aos elevados tempos de processamento da busca por soluções, principalmente para redes maiores.

Assim, o sistema viário existente é representado de forma simplificada para o projeto da rede. No caso específico do projeto de rede estrutural é necessária apenas a modelagem das vias onde seja viável a operação de ônibus de maior porte, considerando características como capacidade da via, raios de giro de conversões e velocidade máxima permitida.

Em São Paulo, esse viário foi denominado VEIO (“Viário Estrutural de Interesse do Ônibus”) pela Prefeitura de São Paulo (PMSP, 2017a), sendo o conjunto de vias do sistema viário principal da cidade que “estruturam e organizam a realização dos deslocamentos de ônibus da cidade constituindo o viário de apoio do Subsistema Estrutural de Ônibus” (PMSP, 2017a). O VEIO é uma indicação das vias adequadas para circulação de linhas estruturais de ônibus, mesmo que hoje não existam linhas operando por este viário. Critérios na definição deste viário incluem hierarquia viária (preferencialmente vias de trânsito rápido e arteriais), presença de faixas exclusivas e corredores exclusivos.

Considera-se então nesta pesquisa o sistema viário estrutural representado por *links*, nós e terminais, representando computacionalmente as vias e os terminais onde é permitida a circulação de linhas de ônibus estruturais. Os *links* são a representação de um segmento viário com um tempo de viagem associado, os nós são encontros de segmentos viários e os terminais são estruturas que servem de ponto inicial ou final das linhas com infraestrutura adequada para operação, conforme apresentado no Capítulo 2.

Nesta pesquisa, considera-se que o conjunto de terminais é conhecido a priori e sem restrição de capacidade em termos de número de linhas e/ou volume de chegadas/partidas. Esta escolha é adotada a fim de evitar incrementar ainda mais a complexidade do problema, que já é bastante complexo por si só, e pelo fato do estudo de caso de aplicação da metodologia ser uma rede estrutural para o período da madrugada, onde o número de linhas em operação é muito menor que nos horários de pico de dias úteis (para os quais os terminais são dimensionados).

Uma representação em mapas desses elementos é mostrada na Figura 5.3 para a região de Pinheiros, em São Paulo. No mapa superior está apresentado a indicação do VEIO, ou seja, o conjunto de vias adequadas para circulação de linhas estruturais de ônibus. Ao meio, estão representados os pontos de parada e o terminal da região (Terminal Pinheiros). Abaixo na figura, está a representação da oferta através nós e *links*. O Terminal Pinheiros corresponde ao nó 339. Pode-se observar, na Figura 5.3, que algumas vias foram simplificadas em sua representação.

Para a construção desta representação, primeiramente definem-se os nós. Estes devem ser dispostos onde ocorrem interseções de vias estruturais. Caso venha a ocorrer uma concentração de nós muito próximos entre si, como no caso à esquerda da representação do VEIO na Figura 5.3, recomenda-se a agregação em um único nó tanto para reduzir a complexidade da representação como também por não ser necessário nem vantajoso poder definir o itinerário rua a rua neste nível de detalhe nesta representação agregada.

Ressalta-se que em sistema viários de cidades existem vias de apenas um sentido. Para o caso de vias estruturais de sentido único, como no caso das duas vias paralelas entre si (distantes uma quadra) como mostrado na parte superior Figura 5.3, recomenda-se o uso de apenas um *link* bidirecional para simplificação. Nesta pesquisa, utilizam-se apenas links bidirecionais, ou seja, todos os links permitem ida e a volta. Caso haja apenas um sentido sem via de retorno, devem ser tratados caso a caso. Esta escolha de utilização apenas de links bidirecionais é adotada com a finalidade de simplificar o sistema viário de forma a reduzir os tempos de processamento nas etapas posteriores.

Em seguida são definidos os *links* desta rede que conectam os nós dispostos. Os links devem ser adicionados a partir dos nós até seus vizinhos. A adição de um *link* deve ser realizada quando existe um sistema viário estrutural que conecte os nós em questão. Para esta pesquisa, os tempos de viagem dos *links* são fixos, estimados a partir de uma velocidade fixa e sua extensão, alinhado com as pesquisas anteriores.

Ao final da definição da rede, todos os nós devem possuir ao menos um *link* que o conecte a outro e que a rede seja conectada tal que seja possível, a partir de cada um dos nós, atingir todos os demais nós da rede, direta ou indiretamente, ou seja, utilizando um ou mais *links*.

Figura 5.3: Representação por mapas dos elementos do sistema viário estrutural para a região de Pinheiros, São Paulo: sistema de vias estruturais denominado VEIO (acima), pontos de parada e terminal regional (meio) e representação computacional (abaixo).

Fonte: Mapas: Bing Maps, Microsoft, HERE. Terminais, pontos de parada: SPTrans. VEIO: Prefeitura de São Paulo. Nós e Links: Próprio autor no software QGIS.

A definição do sistema viário estrutural para o projeto da rede não é exata e permite uma flexibilidade quanto ao nível de detalhamento construído para a representação. Um detalhamento maior (isto é, mais nós, mais *links*) traz o benefício de permitir melhores estimativas das demandas das linhas, no entanto, aumentam muito os tempos de processamento, já que muitas etapas envolvem busca de caminhos, que são mais lentas em sistemas viários maiores.

5.4 Projeto da Rede Estrutural (Nível 1): Sequência de Terminais atendidos e número de linhas

Conforme apresentado na Seção 5.1, a estrutura geral do método para projeto da rede estrutural se baseia em quatro níveis: 1) definição do número de linhas estruturais e sequência de terminais atendidos por cada uma das linhas; 2) para cada linha, determinação do trajeto entre terminais; 3) cálculo do custo generalizado, das frequências e da frota das linhas e 4) detalhamento das linhas em sequência de pontos de parada e avaliação conjunta com rede de linhas locais existente.

No Nível 1, para uma população de soluções, ou seja, um conjunto de diversas redes estruturais projetadas, faz-se uma busca para encontrar aquelas que melhor atendam ambas as funções objetivo z_1 e z_2 (Equações 4.1 e 4.2), tempos generalizados totais dos usuários e frota total necessária para operação do sistema considerando apenas as ligações entre os terminais, sem considerar ainda os itinerários das linhas no sistema viário estrutural.

A Figura 5.4 representa o fluxograma dos procedimentos realizadas no Nível 1. O Nível 1 recebe como dados de entrada a matriz origem-destino de viagens entre pontos de parada obtida na etapa anterior descrita na Seção 5.2, os terminais, *links* e nós construídos na etapa descrita na Seção 5.3. A partir destes dados, é aplicada uma agregação da demanda de forma a transformar a matriz de pontos de parada em uma matriz de viagens entre terminais, ou melhor, entre áreas de contribuição de demanda de terminais. Esta agregação é realizada pois nesta etapa é definida apenas a sequência de terminais atendidos pelas linhas, logo, a agregação ao nível dos terminais é necessária.

Em seguida, a demanda agregada a cada um dos terminais é o conjunto de dados de entrada para o algoritmo de busca por melhores redes. A metodologia proposta nesta pesquisa se baseia no conceito *de geração e configuração de rotas* (KEPAPTSOGLU; KARLAFTIS, 2009). A busca no Nível 1 utiliza Algoritmos Genéticos, que operam a partir de um conjunto

pré-construído de rotas candidatas possíveis conectando os terminais, a partir do qual são formadas as redes estruturais iniciais. Esse genético será chamado de “*Genético Estrutural*” e fornece como saída uma fronteira de Pareto das melhores soluções válidas encontradas buscando otimizar as funções objetivo z_1 e z_2 alternadamente. Esta fronteira é dado de entrada para o nível seguinte.

Nas próximas subseções são detalhados os procedimentos do Nível 1.

Figura 5.4: Fluxograma do Nível 1 do projeto da rede estrutural.

Fonte: Próprio autor.

5.4.1 Agregação da Matriz OD aos Nós da Rede Viária Estrutural

De modo a alcançar o objetivo de avaliar os custos generalizados dos usuários e pré-dimensionar as frequências de operação das linhas no Nível 1, constrói-se uma matriz de demanda entre os terminais, pois neste nível as linhas são definidas apenas com quais terminais ela conecta, sem detalhamento do itinerário.

Primeiramente, a matriz de viagens entre pontos de parada recebida é agregada aos nós da rede viária estrutural. Para tal, constrói-se um Diagrama de Voronoi com os nós. Dado um certo número de pontos no plano, o Diagrama de Voronoi desses pontos divide o plano de acordo com a regra do vizinho mais próximo: cada ponto é associado com a região do plano mais próxima a ela. Cada ponto numa fronteira é equidistante de exatamente dois pontos, e cada vértice é equidistante de pelo menos três (AURENHAMMER, 1991). A utilização do Voronoi justifica-se pelo fato desta técnica permitir a agregação da demanda com uma operação espacial rápida. O resultado do Voronoi aplicado nos nós da rede está representado na Figura 5.5.

Aplicando-se o diagrama de Voronoi aos nós, é feita a associação da demanda de cada ponto de parada ao respectivo nó com base no plano correspondente, de forma a se obter uma matriz de demanda agregada *entre nós* da rede. Na Figura 5.5, pode-se observar que um nó pode representar a agregação de dezenas de pontos de parada compreendendo regiões que variam de algumas quadras até bairros inteiros. Se, por um lado, perde-se em termos de resolução espacial da demanda, por outro lado a agregação com o Voronoi mantém toda a demanda representada.

5.4.2 Agregação da Matriz OD entre Nós aos Terminais

Após a agregação da demanda aos nós estruturais, ela é novamente agrupada numa agregação espacial que represente a potencial área de influência dos terminais. Para tal, cria-se uma área de influência para cada terminal, agrupando nós próximos. A demanda que se desloca partindo ou chegando de qualquer nó daquela área de influência fica associada ao terminal. Para cada nó define-se um terminal associado, possibilitando assim a formação de uma matriz OD entre terminais, que será usada na avaliação das funções objetivo neste Nível 1.

Para a definição desta área de contribuição, foi realizada uma análise e classificação visual dos nós da rede, de forma a atribuir um terminal associado a ele. Esta avaliação baseou-se na existência de um sistema viário que permitisse a conexão do nó ao terminal. Embora tenha sido realizada visualmente, também poderia ser aplicado algum método, considerando o terminal que o sistema viário estrutural permite alcançar com menor tempo de viagem, por exemplo.

Conforme ilustrado na Figura 5.6, todas as demandas dos pontos de parada nas áreas do *Voronoi* dos nós na cor azul claro (no centro) estão associadas ao Terminal Vila Mariana (nó 219). Por exemplo na Figura 5.6, a demanda da linha estrutural conectando o Terminal Vila

Mariana ao Terminal Pinheiros será a soma de todas as demandas dos pontos de parada das áreas em azul claro destinadas aos pontos das áreas em cor rosa claro (região à esquerda, incluindo nós 339, 19, 20, 21, 22, 23, 38, ...).

Figura 5.5: Rede Estrutural com o Diagrama de *Voronoi* dos nós.

Fonte: Próprio autor.

Apesar da perda da resolução espacial da matriz, a vantagem advinda ao processamento do método é notória pois o número de células na matriz se reduz drasticamente: no estudo de caso a ser apresentado, o número de células da matriz entre nós para a matriz entre terminais cai 99,13%. No Nível 2 do projeto da rede estrutural, esta agregação é desfeita e novamente volta-se a utilizar a matriz agregada nos nós.

A Figura 5.7 apresenta um mapa ilustrando a divisão das áreas de influência definidas para alguns terminais localizados na área central da cidade de São Paulo. Observa-se que as áreas são irregulares, de tamanho equivalente a alguns quilômetros quadrados e algumas inclusive possuem uma área de influência mais retangular em função do sistema viário estrutural do entorno.

Figura 5.6: Nós associados a um Terminal.

Fonte: Próprio autor, software QGIS.

Figura 5.7: Área de agregação da demanda dos terminais para a região central de São Paulo.

Fonte: Mapa: Bing Maps, Microsoft, HERE. Terminais: SPTrans.

5.4.3 Banco de Rotas Candidatas Estruturais entre Terminais

O banco ou conjunto de rotas candidatas para a definição das redes estruturais de ônibus é composto por todas as linhas que são consideradas para fazerem parte da rede. Para sua construção são avaliadas as restrições pertinentes de modo a gerar apenas linhas válidas e que sejam atrativas aos usuários em termos de tempo de viagem caso sejam adicionadas à rede.

Na metodologia proposta nesta pesquisa, a definição das linhas acontece de três formas: quais terminais cada uma das linhas atende; para cada linha, qual o melhor itinerário entre nós da rede viária estrutural e a sequência de pontos de parada. No Nível 1, a rede é composta por linhas definidas apenas a partir de quais terminais elas atendem e sua sequência. Desta forma, o banco de rotas candidatas estruturais entre terminais que é gerado contém apenas as possibilidades válidas de linhas indicando quais terminais atendem. Nesta pesquisa esse banco de rotas do Nível 1 é referenciado simplificarmente por “Banco Estrutural”.

O algoritmo usado para criar esse banco de rotas entre terminais é apresentado na Figura 5.9. O procedimento inicia com o cálculo dos caminhos mais rápidos entre todos os terminais e as distâncias correspondentes. Em seguida, para cada terminal, considera-se cada outro terminal como destino para se formar uma linha.

Caso a distância a ser percorrida no caminho mais curto entre eles seja menor que a extensão máxima permitida para uma linha então é adicionada a rota estrutural ao banco. Aplica-se um limite na extensão máxima para que as linhas não gerem dificuldades em sua operação, seja pela maior irregularidade nos intervalos entre os veículos nos pontos para linhas maiores (por estarem sujeitas a mais interferências), seja pela maior fadiga do motorista. O critério para definição deste parâmetro inclui fatores como quantidade de interferências (semáforos, pontos de parada) nos itinerários e regras trabalhistas atuais do setor.

Este procedimento é realizado de modo a considerar linhas que atendem até um terceiro e um quarto terminal, sempre avaliando a viabilidade da rota em dois critérios: em termos de extensão máxima permitida, atendendo às restrições Extensão das Rotas (3.5.5) e em termos de desvios de tempos máximos permitidos, atendendo às restrições Linearidade das Rotas e Tempos de Viagem (3.5.6). O desvio de tempo máximo permitido é calculado considerando a proporção entre o tempo de viagem entre cada par de terminais atendidos na rota e o tempo de viagem mais curto que os conecta. Este limite é necessário para evitar linhas excessivamente sinuosas que não sejam atrativas aos usuários em termos de tempo de viagem.

Neste trabalho são consideradas linhas com até 4 terminais uma vez que foram observadas linhas estruturais em operação no estudo de caso da cidade de São Paulo que atendem até esse limite de quatro terminais. De toda forma, porém, este limite pode ser modificado na implementação da metodologia, já que permitir o atendimento a um quarto terminal mais do que dobra o número total de rotas do conjunto de rotas candidatas, dificultando bastante a complexidade da busca. Por outro lado, alguns terminais são localizados próximos entre si de tal forma que é favorável o atendimento de mais de dois terminais em uma linha.

O critério de desvio de tempo máximo permitido é aplicado aos pares de terminais atendidos que atendem ao menos a um terminal intermediário. O tempo máximo de viagem entre os terminais deve ser no máximo até um percentual além do tempo de viagem mais rápido caso não houvesse uma parada em um terminal intermediário. Ceder (2015) propõe um limite superior para o tempo de viagem das linhas de 20-50% a mais que o tempo de viagem mais rápido por automóvel, com a ressalva de segmentos desviados do caminho mais curto serem usados buscando maior número de passageiros atendidos. Ressalta-se, no entanto, que este desvio não deve ser muito alto, pois, conforme relatado por Beirão e Cabral (2007) uma das principais barreiras para o uso do transporte público são longos tempos de viagem (em comparação com o automóvel).

Caso a linha atenda dois terminais (denominados j e k) a partir do terminal de origem i (ou seja, $i \rightarrow j \rightarrow k$), são avaliados os tempos de viagem para $i \rightarrow k$, considerando também uma penalidade adicional de alguns minutos no tempo de viagem em virtude da necessidade de entrada no terminal intermediário j , realização de manobras e espera adicional para um eventual volume maior de embarques/desembarques.

Para o caso de linhas que atendem a quatro terminais ($i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow m$), são avaliados quanto ao tempo máximo de viagem os trechos que possuem terminais intermediários, a saber: $i \rightarrow k$, $i \rightarrow m$ e $j \rightarrow m$. O par $i \rightarrow m$ recebe penalidade duas vezes, para os terminais intermediários j e k . Os demais pares $i \rightarrow j$, $j \rightarrow k$ e $k \rightarrow m$ não precisam de verificação de tempo pois não há influência da penalidade adicional e o tempo de viagem considerado já é o mais rápido.

Para exemplificar este algoritmo, o mapa apresentado na Figura 5.8 mostra algumas possibilidades de trechos partindo do Terminal Vila Madalena para a região leste da cidade de São Paulo. Observa-se que linhas diretas longas como a Terminal Vila Madalena – Terminal

Carrão podem não ser geradas em função do limite de extensão máxima da linha. A seguir estão listadas algumas rotas possíveis:

- Vila Madalena – Barra Funda;
- Vila Madalena – Barra Funda – Santana – Penha;
- Vila Madalena – Parque Dom Pedro II;
- Vila Madalena – Parque Dom Pedro II – Belém – Carrão;
- Vila Madalena – Parque Dom Pedro II – Aricanduva;
- Vila Madalena – Parque Dom Pedro II – Sacomã – Carrão;
- Vila Madalena – Vila Mariana;
- Vila Madalena – Vila Mariana – Sacomã – Carrão;

Linhas que exigem um desvio grande (como Term. Vila Madalena – Term. Parque Dom Pedro II – Terminal Barra Funda) geralmente não são geradas pois ultrapassam o critério de desvio de tempo máximo permitido. Teoricamente, poderiam ser adicionadas um total de $(n)(n-1) + (n)(n-1)(n-2) + (n)(n-1)(n-2)(n-3)$ rotas, onde n é o número de terminais da rede. Se forem 32 terminais, por exemplo, seriam 893.792 linhas que atendem até 4 terminais, mas observou-se que os critérios de desvio de tempo e distância total máxima eliminam 98,87% dessas possibilidades de linhas, principalmente com a penalidade de alguns minutos adicionada após cada atendimento em um terminal.

O procedimento de análise das combinações verifica a possível inclusão de linhas repetidas, ou seja, sendo i, j e k terminais, a linha $k \rightarrow j \rightarrow i$ não é incluída caso já exista a linha $i \rightarrow j \rightarrow k$. Na formação da rede, toda vez que uma linha for adicionada, será incluída também seu sentido inverso. Além disso, nenhum terminal é atendido duas vezes em uma mesma linha.

Cabe ressaltar que durante a posterior construção dos itinerários, as linhas podem vir a passar por nós de outros terminais. Por exemplo, na Figura 5.8, um itinerário da linha que liga os terminais Vila Madalena – Parque Dom Pedro II – Aricanduva poderia passar pelo Term. Belém. No entanto, não será programado para esta linha adentrar o terminal e ela apenas poderá realizar atendimento de embarque/desembarque em uma plataforma externa, se houver, operando como um ponto de parada comum.

Com base nos experimentos computacionais realizados, o Banco Estrutural pode conter centenas até milhares de linhas possíveis para a rede e é então usado para montar as linhas estruturais no Nível 1 com a aplicação do “Genético Estrutural”.

Figura 5.8: Mapa ilustrando algumas conexões entre terminais possíveis, saindo do Terminal Vila Madalena em uma rota que vai sentido zona leste da cidade de São Paulo. O mapa representa apenas uma pequena parcela das ligações possíveis, de modo a ilustrar as possibilidades de linhas geradas pelo algoritmo.

Fonte: Próprio autor.

Algoritmo 1: Cria Banco de Rotas Candidatas Estruturais entre Terminais (“Banco Estrutural”)

Entrada: parâmetros: desvio de tempo máximo; extensão máxima das rotas (extensaoMaximaRota); penalidade de tempo adicional; intervalo das linhas estruturais; tempo de espera nos terminais de ponta.

Saída: rotas candidatas estruturais com a quantidade e sequência dos terminais atendidos.

Início

Calcular todos os tempos de viagem mais rápidos e distâncias destes caminhos entre todos os terminais

Para cada terminal i **Faça**

Para cada terminal j **Faça**

Se $i \neq j$ **Então**

dist_ij = distanciaNoTrajetoMaisRapido[i][j]

distanciaTotalLinha = dist_ij

Se distanciaTotalLinha < extensaoMaximaRota **Então**

Adiciona Rota Estrutural i-j

Para cada terminal k **Faça**

Se $k \neq i \neq j$ **Então**

dist_jk = distanciaNoTrajetoMaisRapido[j][k];

distanciaTotalLinha = dist_ij + dist_jk;

Verifica critério de tempo máx. após penalidade adicional

Se distanciaTotalLinha < extensaoMaximaRota **Então**

Adiciona Rota Estrutural i-j-k

Para cada terminal m **Faça**

Se $m \neq k \neq i \neq j$ **Então**

dist_km = distanciaNoTrajetoMaisRapido[k][m];

distanciaTotalLinha = dist_ij + dist_jk + dist_km;

Verifica critério de tempo máx. após penalidade adicional

Se distanciaTotalLinha < extensaoMaximaRota **Então**

Adiciona Rota Estrutural i-j-k-m

Fim Se

Fim Se

Fim Para cada terminal m

Fim Se

Fim Se

Fim Para cada terminal k

Fim Se

Fim Se

Fim Para cada terminal j

Fim Para cada terminal i

Fim

Figura 5.9: Pseudocódigo do algoritmo que cria o banco de rotas estruturais entre terminais para busca no Nível 1.

Fonte: Próprio autor.

5.4.4 *Genético Estrutural*

O conjunto de rotas candidatas ligando terminais criado é dado de entrada para a busca de soluções otimizadas para o PRTP. No Nível 1, aplica-se a meta-heurística Algoritmos Genéticos para encontrar quais combinações de linhas (neste momento apenas conexões entre terminais, sem definição de itinerário) desse conjunto geram soluções otimizadas no tocante às funções objetivo z_1 e z_2 , dados pela soma dos custos generalizados dos usuários e frota total necessária para operação da rede, respectivamente. A descrição dos Algoritmos Genéticos (AG) a seguir é baseada no trabalho anterior do autor (Arbex, 2015), detalhando posteriormente o funcionamento dos operadores na presente pesquisa. O algoritmo genético utilizado neste nível será denominado “*Genético Estrutural*”.

Os Algoritmos Genéticos são meta-heurísticas de busca populacional que replicam computacionalmente a evolução biológica natural, onde cada indivíduo da população representa uma solução ao problema tratado. Conforme Talbi (2009), os Algoritmos Genéticos são baseados na evolução de uma população de indivíduos. Cada indivíduo possui um cromossomo, que representa uma solução do problema. Geralmente, essa população é gerada aleatoriamente, onde cada indivíduo da população é uma versão codificada de uma possível solução do problema. Um valor de aptidão (*fitness*) associa, para cada indivíduo, a qualidade da solução do problema, permitindo avaliar e selecionar os indivíduos mais aptos a sobreviverem ao longo das gerações.

A cada geração, indivíduos são selecionados para compor pais, através de um paradigma de seleção onde aqueles com melhor valor de aptidão tem maior probabilidade de serem selecionados. Em seguida, operadores de cruzamento e mutação atuam em indivíduos selecionados a fim de gerar novos indivíduos. Finalmente, um processo de evolução, através da sobrevivência do mais apto, determina quais indivíduos da população vão sobreviver para a próxima geração, considerando os indivíduos já existentes e os novos gerados, e suas respectivas funções de aptidão. Esse processo é repetido até que um critério de parada seja alcançado.

Talbi (2009) descreve os componentes principais dos Algoritmos Evolucionários que caracterizam a sua aplicação a um determinado problema. Ao longo das próximas subseções os componentes serão detalhados conforme a proposta de aplicação para projeto da rede estrutural do Nível 1. Para facilitar a compreensão, apresenta-se a seguir um resumo destes elementos:

- Representação: a codificação utilizada para representar uma solução do problema de forma computacional;
- Inicialização da População: procedimento heurístico para a construção de soluções iniciais do problema de forma direcionada;
- Fitness: valor real que representa a função objetivo do problema;
- Estratégia de Seleção: procura responder a seguinte questão: “Quais pais devem ser escolhidos para a próxima geração considerando um viés para melhores *fitness* (*aptidões*)”?
- Estratégia de Reprodução: designar operadores de cruzamento e mutação que gerem novos indivíduos;
- Atualização da População: como os novos indivíduos competem com os antigos por um lugar na próxima geração (sobrevivência do mais apto);
- Critério de Parada: definição de quais critérios devem ser atendidos para que o algoritmo conclua o processamento.

Para um melhor aprofundamento na teoria dos Algoritmos Genéticos, o leitor é referenciado ao trabalho de Talbi (2009) e Linden (2012). Nesta seção, a meta-heurística Algoritmos Genéticos é melhor detalhada face a sua aplicação na metodologia proposta neste trabalho. Uma visão geral do “Genético Estrutural” do Nível 1 está apresentado na Figura 5.10 e uma explicação inicial é apresentada a seguir.

O “Genético Estrutural” recebe como dados de entrada o banco de rotas estruturais candidatas entre terminais, os terminais, a rede viária e os parâmetros de entrada necessários. Os parâmetros de entrada são: tamanho da população, número de linhas mínimo e máximo, taxa de reprodução e mutação, quantidade máxima de gerações limite para reinicialização do algoritmo, número máximo de gerações a executar e tempo máximo limite de processamento.

Seu processamento inicia com a leitura dos parâmetros e a geração da população inicial de soluções aleatórias. Em seguida, são calculados os valores de *fitness* f_1 e f_2 de cada indivíduo baseadas nas funções objetivo z_1 e z_2 com aplicação de penalidades necessárias para refletir restrições do problema. A população é então ordenada e são selecionados pais para operadores de reprodução: cruzamento e mutação. Os valores de *fitness* são novamente calculados para a nova população e ela é ordenada.

Algoritmo 2: Algoritmo Genético Estrutural

Entrada: banco de rotas estruturais candidatas entre terminais, parâmetros gerais do Genético Estrutural

Saída: fronteira de Pareto de soluções válidas em relação às funções objetivo z_1 e z_2 ; as linhas indicam quais terminais devem ser conectados (ainda não define itinerários no sistema viário)

Início Genético Estrutural

Ler Parâmetros do Genético Estrutural

Gerar População Inicial Aleatória

Calcular *fitness* f_1 e f_2 [chamar **CalculaFitness**]

Penalizar f_2 (Frota Total) em função da demanda não-atendida

Ordenar População pelo Critério de Custo Generalizado Penalizado

Calcular Limites de Ranking Linear

continuar $\leftarrow$ verdadeiro

Enquanto continuar Faça

Selecionar Todos os Pais pelo Ranking Linear

Cruzamento Uniforme

Mutação

Calcular *fitness* f_1 e f_2 [chamar **CalculaFitness**] dos filhos e mutantes

Atualiza População com Elitismo do melhor indivíduo

Se (numeroDaGeracao mod 2 == 0) **Então** //geração par

Ordenar População pelo Custo Generalizado Penalizado

Senão //geração ímpar

Ordenar População Por Frota Total Penalizada

Fim Se

Preparar Próxima Geração

finalizar $\leftarrow$ Verificação de critérios de finalização [tempo/número de gerações]

Se finalizar == verdadeiro **Então**

continuar $\leftarrow$ falso

Fim Se

Fim Enquanto

Fim Genético Estrutural

Início CalculaFitness

Avalia se todos os Terminais são atendidos por ao menos uma rota

Avalia se é possível chegar em qualquer terminal utilizando até 2 transferências

Alocação da demanda às linhas pelo caminho mais rápido

Calcular Frequências

Calcular Frota Necessária [f_2 que representa z_2]

Calcular Tempo de Viagem dentro do veículo e tempo de espera

Calcular Custo Generalizado Total com penalidade para número de linhas excedentes

[f_1 que representa z_1]

Fim CalculaFitness

Figura 5.10: Pseudocódigo do Algoritmo Genético Estrutural aplicado no Nível 1.

Fonte: Próprio autor.

De modo a buscar soluções que atendam ambos os objetivos z_1 e z_2 , as variáveis utilizadas para ordenamento da população se alternam entre f_1 e f_2 . Desta forma, ora em uma geração são priorizadas as soluções que beneficiem os usuários, ora são priorizadas as soluções que beneficiem aos operadores/gestores em função da redução da frota. Esta estratégia está alinhada com Arbex e Cunha (2015), que apresentam bons resultados balanceados para os dois objetivos na instância de teste de Mandl. O Genético Estrutural é executado até que se atinja um critério de parada definido *a priori*, seja tempo total de processamento ou número máximo de gerações.

Nas próximas subseções são detalhadas as características do “Genético Estrutural” com base nos elementos de um AG e no que foi apresentado no pseudocódigo da Figura 5.10.

5.4.4.1 Genético Estrutural: Representação do Cromossomo

A forma de representação de uma solução no Genético Estrutural é um vetor binário com tamanho igual ao número de rotas candidatas estruturais entre terminais: o valor 1 denota se a rota faz parte da rede, e zero caso contrário. Esta forma de representação está apresentada ilustrativamente na Figura 5.11, em que três indivíduos são representados, mostrando possibilidades de 4, 5 e 2 linhas na rede com base em um banco de rotas estruturais composto de 7 linhas. Deve-se notar que o número total de possibilidades de redes é 2^n , onde n é o número de rotas candidatas.

Esta representação foi escolhida pois permite a representação de todas as possibilidades de combinações das linhas para formar a rede, e é propícia para a aplicação dos operadores do AG. Além disso, esta representação promove o atendimento da restrição Rotas Únicas (3.5.15), pois uma linha só poderá ser incluída uma única vez na rede.

População:								
Indivíduo 1:	1	1	0	1	0	1	0	4 linhas na rede
Indivíduo 2:	0	1	1	1	0	1	1	5 linhas na rede
Indivíduo 3:	1	0	0	1	0	0	0	2 linhas na rede

Figura 5.11: Representação de uma solução.

Fonte: Próprio autor.

5.4.4.1 Genético Estrutural: População Inicial

Conforme Talbi (2009), as meta-heurísticas baseadas em população são naturalmente mais exploratórias. Desta forma, o critério principal para considerar na inicialização é a diversificação de soluções. Se o conjunto de soluções não for diversificado, pode ocorrer uma convergência prematura.

A estratégia de inicialização da população utilizada no Genético Estrutural é a *aleatória*: primeiramente é escolhido um número *NR* aleatório de linhas para compor a solução que esteja entre o número mínimo e máximo de rotas permitidas. Em seguida, preenche-se *NR* posições aleatórias de um vetor de zeros do tamanho do número de linhas do banco de rotas com o valor 1.

5.4.4.2 Genético Estrutural: Viabilidade dos Indivíduos

Pode ocorrer que algumas soluções geradas aleatoriamente para a população inicial sejam inviáveis por não atenderem a alguma restrição do problema, já que não há garantia de geração exclusiva de soluções viáveis (por exemplo, o conjunto de linhas estruturais que compõem uma solução do genético não conectar todos os nós da rede). O Genético Estrutural trabalha com soluções inválidas na busca por meio de penalidades adicionadas aos valores das funções de *fitness*. De toda forma, são salvas para continuidade de busca no Nível 2 apenas soluções consideradas válidas.

Uma solução válida é aquela que atende às restrições apresentadas anteriormente na Tabela 4.1. Nesta etapa são realizadas verificações especificamente quanto às restrições Atendimento da Demanda (restrição 3.5.7), Número de Linhas (3.5.8), Atendimento dos nós (nesta etapa, cada nó representa um terminal e toda sua área de contribuição de demanda) (3.5.13) e Rotas Conectadas (3.5.14). Toda vez que um novo indivíduo surge na população a sua viabilidade é avaliada.

Para a avaliação das restrições correspondentes ao Atendimento da Demanda, Atendimento dos nós e Rotas Conectadas, verifica-se se é possível chegar, partindo de cada um dos terminais, a todos os outros realizando até 3 embarques, ou seja, com até 2 transferências. Foi adotado este critério pois a realização de transferências é algo penoso ao usuário e, portanto, deve ser minimizada. Caso não seja possível, isto pode ser devido às razões: ao fato de um terminal não possuir nenhuma linha que o atenda; alguma das rotas da rede não permita conexão

com outras pela falta de nós em comum ou a viagem exigir três ou mais transferências. Viagens que requerem três ou mais transferências são consideradas não-atendidas.

A avaliação do número de linhas da solução é direta: caso seja gerado um indivíduo com mais linhas que o máximo permitido, a solução é considerada inválida. Indivíduos inválidos, seja pela existência de demanda não atendida ou por um número a mais de linhas são penalizados na aptidão (ou *fitness*).

5.4.4.3 Genético Estrutural: Aptidão (ou *fitness*)

A aptidão de um indivíduo representa a qualidade da solução. Para o Genético Estrutural são adotadas duas funções de aptidão que são consideradas alternadamente: f_1 e f_2 , que correspondem às funções objetivo z_1 e z_2 com a adição de penalidades. A função de aptidão f_1 está apresentada na Equação 5.1. Ela se baseia no “excedente” de custo generalizado dos usuários estimado através da Equação 5.3, que por sua vez busca refletir a função objetivo z_1 com a inclusão adicional de penalidade associada à demanda não atendida na rede. A Equação 5.3 é composta pela:

- soma dos tempos de viagem totais subtraídos dos tempos de viagem mais rápidos;
- penalidade de tempo de viagem adotada para a demanda não atendida;
- tempo de espera total dos usuários e da demanda não atendida;
- pelas transferências na rede adicionadas uma penalidade de transferências estimadas para a demanda não atendida.

O termo “excedente” só é usado para diferenciar do conceito de custo generalizado, pois na implementação de f_1 é subtraído o tempo de viagem pelo caminho mais rápido dos tempos de viagem dos usuários para cada par OD. Esta substituição é adotada pois TV_{ij} tende a crescer com o aumento da demanda atendida e $TV_{ij} - TV_{ij}^{min}$ reflete apenas o tempo excedente dispendido pela demanda de passageiros d_{ij} entre os nós i e j .

A demanda não atendida é incorporada à f_1 por três termos: tempo de viagem, tempo de espera e penalidade de transferência equivalente para a demanda não atendida. O tempo de viagem equivalente para a demanda d_{ij} não atendida é mostrado na Equação 5.4: 3 vezes o valor do tempo de viagem pelo caminho mais rápido para aquele par OD. Este valor foi adotado de modo a penalizar mais a demanda não atendida nas soluções.

O tempo de espera equivalente para a demanda d_{ij} é calculado através da Equação 5.5: volume de viagens não atendida multiplicado por 7,5. Este valor advém de um tempo de espera médio de 7,5 minutos, considerando uma linha com intervalo de 15 minutos, valor escolhido por ser um limitante superior de intervalo para linhas estruturais. Conforme mencionado na seção 3.5.1, intervalos grandes aumentam muito o tempo de espera e reduzem a atratividade do serviço de transporte.

Finalmente, a penalidade de transferências para a demanda não atendida é indicada no último termo da Equação 5.3: cada viagem não atendida equivale a 3 transferências a mais na rede. Este valor foi adotado pois só são consideradas atendidas viagens que exigem até 2 transferências, portanto, o número mínimo de transferências para estas viagens é 3.

De modo a considerar a restrição 3.5.8 (Número de Linhas na rede), é adicionada uma penalidade para diminuir a aptidão de indivíduos que tenham mais linhas que o número máximo recebido como parâmetro, conforme a Equação 5.1.

A Equação 5.2 representa a segunda função de aptidão f_2 , frota total adicionada as devidas penalidades de modo a reduzir a aptidão de indivíduos que tenham tanto um percentual de demanda não atendida, incorporando a restrição 3.5.7 (Atendimento da Demanda), como linhas excedentes. Ressalta-se que f_2 exige o conhecimento de MFR , ou seja, da maior frota de todos os indivíduos da população; logo, o seu cálculo é realizado duas vezes, uma primeira vez para cálculo de z_2 (frota total, apenas) e uma segunda vez para incluir o segundo termo da Equação 5.2, conforme indicado no pseudocódigo da Figura 5.10. Inclui-se um fator de multiplicação de 1,2, adotado com base nos testes iniciais das funções de aptidão, para aumentar a influência da penalidade do percentual da demanda não-atendida e de rotas excedentes.

$$\min f_1 = ECG + ECG \cdot \frac{NR_{sol} - NR_{max}}{10} \quad (5.1)$$

$$\min f_2 = z_2 + (PNA \cdot (MFR + 1)) \cdot (1 + (NR_{sol} - NR_{max})) \cdot 1,2 \quad (5.2)$$

$$ECG = \sum_{i,j \in N} (TV_{ij} - TV_{ij}^{min}) + \sum_{i,j \in N} TV_{ij}^{DNA} + PE \cdot \sum_{i,j \in N} (TE_{ij} + TE_{ij}^{DNA}) +$$

$$PT \cdot \sum_{i \in N} TR_i + PT \cdot \sum_{i,j \in N} DNA_{ij} \cdot 3 \quad (5.3)$$

$$TV_{ij}^{DNA} = TV_{ij}^{min} \cdot 3 \quad (5.4)$$

$$TE_{ij}^{DNA} = DNA_{ij} \cdot 7,5 \quad (5.5)$$

Onde:

ECG = excedente de custo generalizado

z_2 = função objetivo 2 [equação 4.2]

NR_{sol} = número de rotas na solução da rede de transporte público

NR_{max} = número máximo de rotas na solução da rede de transporte público

PNA = percentual de demanda não atendida (3 ou mais transferências)

DNA_{ij} = demanda não atendida do par ij

MFR = maior frota dentre todos os indivíduos da população

TV_{ij} = tempo de viagem apenas dentro do veículo para a demanda d_{ij}

TV_{ij}^{min} = tempo de viagem pelo caminho mais rápido para a demanda d_{ij}

TE_{ij} = tempo total de espera dispendido pela demanda d_{ij}

TR_i = número total de transferências realizadas no nó i

TV_{ij}^{DNA} = tempo de viagem correspondente a demanda d_{ij} não atendida

TE_{ij}^{DNA} = tempo de espera correspondente a demanda d_{ij} não atendida

PE = penalidade da percepção do tempo de espera em relação a

1 minuto de tempo de viagem dentro do veículo

PT = penalidade de tempo adicional relativa à realização de transferências

As funções de aptidão adotadas no Nível 1 foram escolhidas de forma a penalizar fortemente a demanda não atendida e um número de linhas acima do máximo sugerido. Por ser uma etapa que utiliza uma demanda espacialmente muito agregada a redução da demanda não atendida é essencial, já que mesmo que ela seja atendida neste Nível 1 não é garantido que continue atendida quando são definidos os itinerários com uma desagregação espacial maior.

Adicionalmente, para o cálculo de z_2 (parcela da frota total de f_2) é necessária a definição das frequências de operação das linhas, que é realizado através da Equação 5.6 que calcula a frequência como a razão entre o carregamento de passageiros no trecho crítico e a capacidade total de passageiros considerada para aquele veículo (capacidade de lugares sentados multiplicado pelo fator de lotação adotado) (CEDER; WILSON, 1986).

Cabe ressaltar que o cálculo da frequência desta etapa não é definitivo: ele atende ao objetivo de *estimar* a frota total necessária para operação da rede. Pelo fato de a demanda estar

especialmente muito agregada, algumas linhas podem exigir mais frota que a necessária nesta etapa. A frota final da rede estrutural será calculada no Nível 3.

$$f_r = \frac{Q_r^{max}}{FC \cdot CAP} \quad \forall r \in R \quad (5.6)$$

Onde:

r = rota da solução

R = solução da rede de transporte público, composta pelas rotas selecionadas do banco de rotas B

Q_r^{max} = carregamento de passageiros no trecho crítico da rota
(segmento de maior demanda entre dois terminais)

FC = fator de carregamento adotado

CAP = capacidade de passageiros sentados do veículo

A obtenção do valor de Q_r^{max} de todas as linhas e exige a alocação da demanda na rede para obtenção do trecho crítico de carregamento de cada linha (trecho onde ocorre o carregamento máximo de passageiros). No Nível 1 é implementada uma alocação pelo caminho mais rápido na rede. O algoritmo de alocação implementado e seu uso no cálculo de z_2 está descrito no pseudocódigo da Figura 5.12.

O algoritmo de alocação construído é baseado na alocação tudo-ou-nada, que aloca a demanda no caminho mais rápido (*all-or-nothing shortest-path transit assignment*). Inicia-se com a enumeração dos caminhos possíveis na rede de transporte público no procedimento chamado de *ListaOpçõesDeCaminhoNaRede* na Figura 5.12. Este procedimento começa com a inicialização de lista de opções de caminhos diretos, com 1 transferência e 2 transferências. Os caminhos indicam, para um determinado par OD, qual linha deve ser utilizada e quais os locais de embarque e desembarque correspondentes. Caso haja necessidade de transferências, o caminho indicará todas as linhas que devem ser utilizadas e os respectivos pontos de embarque e desembarque onde ocorrerão as transferências.

Após a inicialização, são examinados todos os terminais i da rede; para cada terminal i , são percorridos todos os terminais j atendidos diretamente a partir dele, ou seja, todos os terminais j que podem ser alcançados na rede a partir do terminal i sem a realização de transferências. Este algoritmo permite listar as opções de caminhos com ligações diretas, registrando também o tempo de viagem da opção. Após a verificação de todos os terminais j

atendidos diretamente a partir de cada origem i , é realizada a mesma busca para os terminais k atendidos diretamente partindo de j , encontrando assim as opções de ligação com uma transferência ($i \rightarrow j \rightarrow k$). Finalmente, são percorridos todos os terminais m atendidos diretamente de cada terminal k para adicionar as opções de ligação a partir de i com duas transferências (isto é, seguindo a sequência $i \rightarrow j \rightarrow k \rightarrow m$).

Com a enumeração dos caminhos possíveis na rede para cada par OD, é feita a alocação pelo caminho mais rápido. No Nível 1 foi adotada a alocação pelo caminho mais rápido pois seu tempo de processamento dentre os métodos de alocação é um dos mais reduzidos e adequados para projeto de redes (AMIRIPOUR; CEDER; MOHAYMANY, 2014b), permitindo avaliar melhor a região de busca.

Para cada par OD entre terminais é buscada a opção de caminho mais rápida que os conectem, considerando todas as possibilidades de trajeto utilizando nenhuma, 1 ou 2 transferências. Caso não seja encontrado nenhum caminho de até 2 transferências, a demanda é considerada não atendida. Caso haja caminhos, a demanda é alocada ao caminho mais rápido que conecte os terminais, independentemente do número de transferências do caminho. Ressalta-se que nesta etapa não se considera o tempo de espera das linhas para aumentar a velocidade do algoritmo de alocação.

A alocação da demanda é a adição, para cada trecho utilizado de todas as linhas do caminho, do volume total de viagens daquele par OD. Ao final do processo, são obtidos os perfis de carregamento de todas as linhas e sentidos, que permite encontrar Q_r^{max} , o carregamento máximo do perfil de carregamento, calcular as frequências das linhas. Com as frequências calculadas, a frota de cada linha é estimada através da divisão do tempo de ciclo da linha dividido pelo intervalo da mesma (Equação 5.7).

O tempo de ciclo é o tempo necessário para o veículo percorrer todo o trajeto da linha no sentido de ida, de volta e retornar ao ponto de partida inicial. Ele é calculado pela soma dos tempos de viagem dos trechos da linha e dos tempos adicionais de espera nos terminais extremos e da penalidade de tempo adicionada na parada de terminais intermediários. O intervalo da linha é o inverso da frequência dela (Equação 5.8). A frota total (z_2) é obtida somando-se as frotas de todas as linhas da rede.

$$FT_r = \frac{TC_r}{h_r} \quad \forall r \in R \quad (5.7)$$

$$h_r = \frac{1}{f_r} \quad (5.8)$$

Onde:

FT_r = frota da rota r

TC_r = tempo de ciclo da rota r

f_r = frequência da rota r

Com a frota total calculada, finaliza-se então o cálculo das duas funções de aptidão f_1 e f_2 escolhidas para o Genético Estrutural do Nível 1 da metodologia do projeto de redes estruturais de transporte público por ônibus.

5.4.4.1 Genético Estrutural: Seleção

O método de seleção é um dos principais componentes dos algoritmos evolucionários. O princípio central da estratégia de seleção é “quanto melhor o indivíduo, maiores são as suas chances de ser pai”. Esta pressão seletiva direcionará a população a soluções melhores. Entretanto, como a diversidade pode levar a soluções melhores, os piores indivíduos também têm de ter uma chance de serem selecionados para a busca escapar de ótimos locais (Talbi, 2009).

No Genético Estrutural do Nível 1 é aplicada a estratégia de seleção por Ranking Linear (*Linear Ranking Selection*) (Talbi, 2009). Ela associa a cada indivíduo uma probabilidade de seleção que é proporcional à sua posição no ranking de aptidão (*fitness*). Como no PRTP procuramos uma minimização, a probabilidade de seleção é inversamente proporcional ao seu *fitness*.

Para a seleção por ranking linear os indivíduos são inicialmente ordenados de acordo com o valor de aptidão e a pontuação N é designada ao melhor indivíduo $r(1) = N$, e a pontuação 1 ao pior indivíduo $r(N) = 1$, sendo N o número de indivíduos. A probabilidade de seleção é linearmente atribuída aos indivíduos de acordo com sua pontuação. A probabilidade de cada indivíduo ser selecionado é determinada pelo quociente entre a sua posição no ranking e a soma de todas as posições.

Algoritmo 3: Cálculo da Frota Total (z2)**Entrada:** solução**Saída:** frota total necessária (z2)**Início Cálculo Frota Total**Alocar a Matriz de Demanda [chamar **AlocaçãoPeloCaminhoMaisRápido**]

Calcular Frequências pelo maior carregamento (trecho crítico)

Calcular Frota necessária para cada linha

Calcular Frota Total da Rede (z2) somando a frota de todas as linhas

Fim Cálculo Frota Total**Início AlocaçãoPeloCaminhoMaisRápido**opcoesDeCaminhoNaRede $\leftarrow$ chamar **ListaOpçõesDeCaminhoNaRede****Para cada** terminal i **Faça****Para cada** terminal j **Faça****Se** demanda_ij > 0 e i!=j**Se** ExisteOpçãoDeCaminho *//até 2 transferências*Adiciona demanda_ij aos trechos percorridos das rotas da opção
mais rápida da lista de caminhos**Senão** *//demanda não atendida*

demandaNãoAtendida+=demanda_ij

Fim Se**Fim Se****Fim Para cada** terminal j**Fim Para cada** terminal i**Fim AlocaçãoPeloCaminhoMaisRápido****Início ListaOpçõesDeCaminhoNaRede**

Inicializar listaOpçõesDireta vazia

Inicializar listaOpções1Transfer vazia

Inicializar listaOpções2Transfers vazia

Para cada terminal i **Faça****Para cada** terminal j atendido diretamente de i **Faça**listaOpçõesDireta $\leftarrow$ ligação i-j [usando rota que leva diretamente de i para j]**Para cada** terminal k atendido diretamente de j **Faça**listaOpções1Transfer $\leftarrow$ ligação i-k [usando rota que leva de i para j, depois
outra rota de j para k] *//apenas caso não tenha
direta***Para cada** terminal m atendido diretamente de k **Faça**listaOpções2Transfers $\leftarrow$ ligação i-m [usando rota que leva de i para j,
outra de j para k e outra de k para m] *//apenas
caso não tenha com 1 transferência***Fim Para cada** terminal m**Fim Para cada** terminal k**Fim Para cada** terminal j**Fim Para cada** terminal i**Fim ListaOpçõesDeCaminhoNaRede**

Figura 5.12: Pseudocódigo do cálculo da Frota Total aplicado no Nível 1.

Fonte: Próprio autor.

Seja r_i a pontuação de um indivíduo na população P de tamanho N e a sua probabilidade de escolha seja p_i . Sua probabilidade de ser selecionado é $p_i = r_i / (\sum_{i=1}^N r_i)$. Assim, a probabilidade de se escolher o melhor indivíduo é $p_N = N / (\sum_{i=1}^N r_i)$ e de se escolher o pior indivíduo é $p_1 = 1 / (\sum_{i=1}^N r_i)$.

5.4.4.2 Genético Estrutural: Método de Reprodução - Cruzamento

Depois que os indivíduos foram selecionados para serem os pais, o papel desta etapa de reprodução é a aplicação dos operadores, como o cruzamento e a mutação (Talbi, 2009). O papel dos operadores de cruzamento é gerar novos indivíduos por meio do cruzamento dos cromossomos dos indivíduos, ou seja, quais linhas são usadas ou não na solução. O operador de cruzamento adotado no Nível 1 foi o Uniforme, onde a chance de herdar cada gene de cada pai é 50% (Talbi, 2009), gerando-se dois filhos (duas novas soluções). No Nível 1 um gene representa uma Rota Estrutural conectando terminais da solução.

Conforme indicado na subseção 5.4.4.1, o método de representação adotado no Nível 1 foi de sequência binária indicando se a rota do conjunto de candidatas está ou não na solução. Assim, seja um conjunto de rotas candidatas de 7 linhas, e um indivíduo 0100011 e outro 1110110, uma solução de 3 e outra de 5 rotas. Caso eles venham a se cruzar e aplicando-se o operador de cruzamento uniforme, os novos indivíduos gerados podem ser, por exemplo, 0110110 e 1110111, conforme ilustrado na Figura 5.13.

Figura 5.13: Exemplo de cruzamento uniforme.

Fonte: Próprio autor.

Com a representação binária e aplicação do método de cruzamento uniforme pode ser que o número de linhas da solução aumente. No exemplo da Figura 5.13, por exemplo, o número de linhas das soluções dos pais eram 3 e 5 rotas, enquanto dos filhos são 4 e 6 rotas. As penalidades nas funções objetivo buscam restringir um aumento além do máximo recebido como dado de entrada.

5.4.4.3 Genético Estrutural: Método de Reprodução - Mutação

A mutação é um operador do AG que tem por finalidade evitar que a busca fique estagnada em uma região de ótimo local, na medida em que modifica ou insere novos genes na população. Os operadores de mutação atuam em um único indivíduo. As mutações representam pequenas mudanças nos indivíduos selecionados da população.

No Nível 1, a mutação é um operador que sorteia indivíduos para mutação com base em uma probabilidade p_m . Caso o indivíduo seja solucionado, a mutação modifica 1 gene escolhido aleatoriamente, alterando seu valor para 0 caso seja 1 e para 1 caso seja 0. Desta forma, o procedimento pode explorar novas regiões do espaço de busca, já que, caso nenhum indivíduo utilize uma determinada rota do conjunto de candidatas, apenas o operador de cruzamento não poderia avaliar uma solução com esta rota, pois o gene herdado seria sempre 0. Com a mutação, linhas novas são inseridas (ou removidas) nos indivíduos.

5.4.4.4 Genético Estrutural: Atualização da População

A atualização da população é a forma como ocorre a escolha dos indivíduos entre pais e descendentes para formar a nova geração. Utilizando um tamanho de população fixa, alguns indivíduos são eliminados de acordo com uma certa estratégia evolucionária. No Genético Estrutural é adotada a estratégia de substituição completa com elitismo do melhor indivíduo, ou seja, toda a população é substituída pelos descendentes, exceto pelo melhor indivíduo da geração atual, que é mantido, de forma a manter a evolução da população sempre para melhores soluções.

5.4.4.5 Genético Estrutural: Exploração do Espaço de Solução

O Genético Estrutural explora o espaço de soluções para aumentar as chances de encontrar soluções mais próximas da ótima. As medidas utilizadas no Genético Estrutural são a substituição de clones por novos indivíduos aleatórios e a reinicialização da população.

Nos Algoritmos Genéticos é preciso lidar com o problema de soluções idênticas entre si, conhecidas como clones. Essas soluções podem ser geradas ao longo do processo de busca e acabam por reduzir a “variabilidade genética” da população devido aos genes repetidos. Dessa forma, toda vez que um filho ou um mutante for gerado é feita uma verificação que avalia se aquele indivíduo será clone de algum já existente na geração atual. Caso seja, então é feita a inicialização de um novo indivíduo de forma aleatória e este é inserido ao invés do clone. Dessa

forma, inserem-se novos genes na população e evita-se a convergência prematura em ótimos locais.

A reinicialização da população é um processo onde todos os indivíduos são eliminados e uma nova população é inicializada aleatoriamente. Este procedimento ocorrerá no Nível 1 caso f_1 esteja a um número pré-determinado de gerações sem melhora. A estagnação de f_1 na busca por muitas gerações pode indicar que se atingiu um ótimo local, e a busca deve ser iniciada novamente para explorar mais o espaço de soluções.

5.4.4.6 Genético Estrutural: Critério de Parada

Por adotar uma reinicialização da população, a busca do Genético Estrutural pode continuar indefinidamente, portanto, é necessário a adoção de critérios de parada para finalizar a busca. No Genético Estrutural são adotados dois critérios de parada: número de gerações e tempo total de processamento.

5.4.4.7 Genético Estrutural: Saída: Fronteira de Pareto

A saída do processamento do Genético Estrutural é um conjunto das melhores soluções válidas (vide subseção 5.4.4.2) que buscam otimizar ambas as funções de aptidão f_1 e f_2 ao se adotar um ordenamento da população alternado entre elas. A cada geração, este conjunto vai sendo formado com o registro da melhor solução válida de cada geração em uma listagem.

Pelo fato de o PRTP ser um problema de otimização multiobjetivo não é possível afirmar que apenas uma única solução deste conjunto selecionado seja a melhor para continuar a busca. Não há uma única solução ótima para um problema de otimização multiobjetivo, mas sim um conjunto de soluções ótimas de Pareto (Talbi, 2009), que representam soluções que melhor atendem tanto aos operadores como aos usuários. Uma solução ótima de Pareto é aquela onde é impossível encontrar uma solução que aumente o desempenho em um critério sem decrescer a qualidade da mesma em pelo menos um outro critério (Talbi, 2009). As soluções ótimas de Pareto são também conhecidas por soluções não-dominadas (Figura 5.14).

Já o conceito de Fronteira de Pareto é uma curva que representa o conjunto de soluções ótimas de Pareto no espaço das funções objetivo (Talbi, 2009). Segundo o autor, obter a fronteira de Pareto de um problema multiobjetivo é a principal meta da otimização multiobjetivo. Entretanto, dado que uma fronteira de Pareto contém um número alto de pontos (por ser uma curva de soluções), uma boa aproximação da fronteira de Pareto pode conter um número limitado de soluções de Pareto, que devem ser tão próximas quanto possível da fronteira

de Pareto exata, assim como devem estar uniformemente distribuídas sobre a fronteira de Pareto (Talbi, 2009).

Dessa forma, finalizado o número de gerações ou o tempo de processamento máximo, as melhores soluções são dispostas em um gráfico de dispersão X e Y, onde X é a frota total (f_2 não-penalizada) e Y representa f_1 . É importante destacar que foi utilizada a função f_2 não-penalizada por duas razões: primeiramente, ela é de mais fácil interpretação. A f_2 não-penalizada é exatamente o valor da frota total estimada; em segundo lugar, ao contrário de f_1 , a penalidade que é aplicada a f_2 durante o algoritmo é variável pois depende das outras soluções que estavam presentes naquela geração. Portanto, optou-se pela remoção da penalidade de f_2 na representação e posterior avaliação das melhores soluções.

Figura 5.14: Soluções de Pareto (não-dominadas) no espaço das funções para as funções de aptidão f_1 e f_2 .

Fonte: Traduzido de Talbi (2009).

As soluções da Fronteira de Pareto (Figura 5.14) neste gráfico de dispersão são selecionadas para seguirem na busca no Nível 2, onde se define o itinerário de todas as linhas como sequência de nós.

5.5 Projeto da Rede Estrutural (Nível 2): Itinerário das Linhas

Nesta seção é descrita a metodologia proposta para a definição do itinerário de cada uma das linhas que compõem a solução selecionada na etapa anterior. Conforme apresentado acima na seção 5.1, a estrutura geral do método para projeto da rede estrutural em 4 Níveis: 1) definição do número de linhas estruturais e sequência de terminais atendidos pelas linhas; 2) determinação do itinerário entre terminais; 3) cálculo do custo generalizado, das frequências e da frota das linhas e 4) definição da sequência de pontos de parada das linhas e avaliação conjunta com rede de linhas locais existente.

No Nível 1 foi obtida uma Fronteira de Pareto de soluções compostas de linhas que conectam terminais com relação aos custos dos usuários e a frota total estimada para operação do sistema, sem considerar os itinerários das linhas no sistema viário estrutural. No Nível 2, objeto desta seção, busca-se determinar os itinerários de cada uma das linhas ao longo do sistema viário representado. O fluxograma geral do processamento que ocorre no Nível 2 é apresentado na Figura 5.15.

O Nível 2 recebe como dados de entrada: os terminais, os *links* (e seus tempos de viagem associados), os nós com a respectiva demanda (agregação da matriz de viagens entre pontos de parada, vide item 5.4.2) e as soluções da fronteira de Pareto obtidas no Nível 1 que refletem melhores custos dos usuários e operadores. As linhas nessas soluções são, no entanto, apenas indicações de quantos e quais terminais cada linha deve passar, sem a definição do itinerário que de fato deve ser percorrido no sistema viário.

No Nível 2 se utiliza um conjunto pré-processado de itinerários candidatos entre todos os pares de terminais da rede. Este conjunto contém uma seleção dos trajetos possíveis entre pares de terminais elaborados com base em critérios bem definidos. O conjunto de itinerários candidatos entre terminais é utilizado para a busca da melhor combinação de itinerários para todas as rotas. Esta busca é realizada através da meta-heurística Algoritmos Genéticos, cuja aplicação nesta etapa é denominada “*Genético Itinerários*”. A escolha da mesma meta-heurística adotada na busca do Nível 1 se baseia no aproveitamento direto da implementação computacional e na demonstração de sua eficiência para busca de redes otimizadas conforme apresentado na revisão da literatura no Capítulo 3.

As soluções avaliadas no Nível 2 são todas as soluções da fronteira de Pareto obtidas no Nível 1. Por possivelmente existir mais de uma solução para ser avaliada neste Nível, é realizado um cálculo do tempo que o “*Genético Itinerários*” dispenderá em cada solução

recebida do Nível 1. Assim, direciona-se mais tempo de busca para as melhores soluções tanto para usuários como para operadores, ou seja, aquelas cujas propostas de rede são mais equilibradas no atendimento a ambos os objetivos. Como soluções extremas (ou seja, muito boas para apenas um dos objetivos) tem baixa aplicabilidade em sistemas reais pelo não atendimento a um dos objetivos, o Nível 2 foca a busca nas soluções mais equilibradas.

Figura 5.15: Fluxograma do Nível 2 do projeto da rede estrutural.

Fonte: Próprio autor.

O Genético Itinerários busca definir os itinerários para as linhas que gerem soluções com as seguintes características: menor número estimado de transferências e maior percentual de demanda atendida pelo sistema estrutural, representadas pelas funções de aptidão f_3 e f_4 , respectivamente (definidas na subseção 5.5.3.2). O aumento da complexidade da busca ao desagregar a demanda nos nós dificulta a utilização das funções f_1 e f_2 do Nível 1 novamente devido a menor eficiência da busca, portanto, neste nível intermediário são utilizadas as funções de aptidão f_3 e f_4 .

Ao final da aplicação do Genético Itinerários é obtida uma Fronteira de Pareto das melhores soluções para f_3 e f_4 com itinerários de todas as rotas, fornecendo o dado de entrada para o Nível 3, quando é feita a alocação final com cálculo das frequências das linhas estruturais.

A seguir são detalhados os componentes do Genético Itinerários.

5.5.1 Banco de Itinerários Entre Terminais

O Banco de Itinerários entre terminais é o conjunto de itinerários candidatos entre todos os pares de terminais da rede cuja distância entre eles seja menor que a extensão máxima das linhas, sendo denominado *Banco Itinerários*. As rotas que entram no Banco Itinerários precisam atender ao critério de tempo máximo de viagem (subseção 3.5.6), logo, verificações são aplicadas para avaliar se a rota atende ao critério de desvio máximo do tempo mais rápido entre os terminais na rede viária que ela atende.

Mesmo que um itinerário atenda o referido critério de tempo máximo, ao longo dele podem existir combinações de pares de nós atendidos que ultrapasse o percentual máximo de desvio permitido. Portanto, a avaliação de desvio de tempo máximo é aplicada a todos os pares de nós atendidos. O tempo de viagem entre cada par de nós tem um limite superior, estimado com base em um percentual além do tempo de viagem mais rápido para o referido par. Esta verificação, no entanto, pode ser muito restritiva para nós que estejam próximos entre si. Assim, a fim de evitar que um caminho alternativo entre dois nós próximos seja considerado inválido quando a diferença de tempo absoluta for baixa, considera-se também um tempo máximo de desvio absoluto, por exemplo de 5 minutos, independentemente do acréscimo em relação ao tempo de viagem mais rápido, conforme ilustrado no exemplo da Figura 5.16.

Na Figura 5.16, o itinerário II em azul tem tempo de viagem total de 18 minutos, enquanto que o tempo de viagem mais rápido (itinerário I em verde) é de 15 minutos, sendo o acréscimo de tempo de viagem de 20% neste caso. Se o critério máximo fosse de até 30% de desvio máximo, então este trajeto seria incluso. No entanto, verifica-se todos os pares contidos no itinerário, de tal forma que o trecho CDE possui tempo de viagem de 6 minutos, enquanto que o tempo mais rápido para C-D é de 3 minutos. Este trecho resulta em 100% de acréscimo $((6 - 3)/3)$, o que invalidaria o itinerário II. Desta forma, conforme indicado no parágrafo anterior, aceita-se um tempo adicional absoluto (arbitrado em 5 minutos) a fim de evitar a não consideração deste itinerário e incluí-lo no *Banco Itinerários*. Já no caso do Itinerário III

(vermelho), o acréscimo no trecho B-E é de 10 minutos, ou 166,67% $((16 - 6)/6)$. Mesmo considerando o desvio absoluto de 5 minutos permitido, este itinerário não será incluído.

Figura 5.16: Verificação de desvio de tempo de viagem ao longo do itinerário.

Fonte: Próprio autor.

O algoritmo proposto para a geração do Banco Itinerários entre terminais encontra-se na Figura 5.17. Ele inicia com a listagem dos pares de terminais para os quais precisam ser gerados itinerários: todos aqueles cuja distância seja menor que a extensão máxima permitida na construção do *Banco Estrutural*. Em seguida o algoritmo faz uma busca de caminhos para cada ligação entre terminais $i \rightarrow j$ a gerar itinerários. Para gerar os caminhos, é usado como base o algoritmo de k caminhos mínimos de Yen (1971). Para cada par, inicia-se com a avaliação do caminho mais rápido, que é o primeiro caminho dos k caminhos mínimos. Ele é necessariamente adicionado ao banco itinerários e com base neste caminho mais rápido é estabelecido o valor

da maior demanda atendida até então e o tempo mínimo de viagem entre o par de terminais sendo avaliado.

Posteriormente, para cada próximo caminho do conjunto de k caminhos mínimos é feito o cálculo do desvio de tempo de viagem entre o terminal de origem e o de destino. Uma avaliação de condição de parada prossegue, verificando o desvio máximo, o número máximo de linhas já inseridas no banco por par OD e o número total de caminhos já avaliados, cujos limites são inseridos como dados de entrada. Caso alguma condição de parada seja verificada, passa-se ao próximo par de terminais para gerar itinerários. Caso não, então o caminho é considerado válido e é feita uma sequência de verificações para avaliar o benefício de inserir o caminho no Banco Itinerários.

A sequência de verificações proposta é decorrente do elevado número de caminhos que podem existir em uma rede viária grande. Para uma ordem de grandeza de centenas de nós e *links*, dois terminais distantes 30 quilômetros entre si podem ser conectados por mais de 10 mil itinerários diferentes, mesmo não desviando mais de 20% do caminho mais rápido. Assim, as verificações buscam reduzir drasticamente o volume de caminhos possíveis no Banco Itinerários, de modo a incorporar caminhos que sejam: rápidos e/ou tenham alta demanda potencial.

Esta lógica inicia classificando o caminho quanto ao número de nós repetidos em comparação com todas as linhas já adicionadas para aquele par de terminais: caso seja alto, então a rota é uma pequena modificação de rotas já adicionadas. Desta forma, ela será adicionada apenas se a demanda potencial (estimada pelos nós atendidos ao longo do caminho) for *maior* que a maior já encontrada até então. Caso o percentual de nós repetidos seja baixo, então o caminho é novo, portanto, mesmo que o ganho de demanda não seja tão grande ela é adicionada. Esta flexibilidade de inserção permite incluir caminhos que passam em nós diferentes e aumentam as possibilidades de conexões entre as linhas na busca no Nível 2.

Pelo fato do algoritmo de geração do Banco Itinerários possuir essas verificações, para que sejam inseridas 10 linhas para um determinado par OD pode ser necessário buscar por 10 mil ou mais caminhos. Esta redução criteriosa do número de possibilidades de caminhos reduz significativamente as possibilidades de itinerários para as rotas estruturais, ao mesmo tempo que garante uma diversidade necessária ao atendimento de mais demanda e uma maior distribuição espacial dos nós atendidos pelas linhas do Banco Itinerários.

Algoritmo 4: Cria Banco de Itinerários entre Terminais (“Banco Itinerários”)

Entrada: rede (*links*, nós e terminais); parâmetros: desvio de tempo máximo entre terminais extremos; número máximo de linhas no banco por par OD; número máximo de linhas a avaliar no k caminhos mínimos; percentual limite de aceite para nós repetidos; percentual limite de aceite para demanda de linha alternativa

Saída: Banco Itinerários para ser usado no Nível 2

Início CriaBancoItinerários

Lista quais pares entre terminais i - j que precisa gerar banco de itinerários

Para cada ligação entre terminais i - j a gerar itinerários **Faça**

$nRotasJáAvaliadas = 0$

    Adicionar no banco o caminho mais rápido

Enquanto houver um um próximo caminho dentre os k caminhos mínimos **Faça**

$nRotasJáAvaliadas += 1$

$razaoTempoViagem = tempoDeViagemCaminho / tempoMinimoPar$

Verificar condições de parada: número máximo de linhas no banco por par OD ($kRotas$), desvio máximo de tempo com relação ao tempo mínimo ($razaoTempoViagem$) e número total de rotas avaliadas ($nRotasJáAvaliadas$)

Se alguma condição de parada atendida **Faça**

Continuar próximo par de terminais

Senão //rota válida

            Calcula percentual de nós repetidos da linha nova com relação aos nós de todas as linhas já adicionadas para i - j

Se $percentualNosRepetidos < percLimiteAceiteNósRepetidos$ **Então**

Se ($demandaPotencial \geq percLimiteAceiteDemandaLinhaAlternativa * melhorDemandaAteEntao$) **Faça**

Faça

Adiciona ao banco itinerário do par i - j o caminho k se válido (desvio)

$kRotas += 1$

                    Atualiza melhor demanda até então

Fim Se

Senão //linha com muitos nós repetidos

Se ($demandaPotencial > melhorDemandaAteEntao$)

Adiciona ao banco itinerário do par i - j o caminho k se válido (desvio)

$kRotas += 1$

                    Atualiza melhor demanda até então

Fim Se

Fim Se

Passa para o Próximo Caminho

Fim Enquanto

Fim Para cada ligação entre terminais i - j a gerar itinerários

Fim CriaBancoItinerários

Figura 5.17: Pseudocódigo do algoritmo que cria o Banco Itinerários.

Fonte: Próprio autor.

De modo a ilustrar o resultado para um par de terminais, a Figura 5.18 apresenta os caminhos criados para o par de terminais Vila Madalena e Vila Mariana, em São Paulo, considerando até caminhos com limite de tempo de 35% a mais que o mais rápido. Na figura, o mais rápido é o caminho 0 (roxo) com demanda estimada de 81, o segundo caminho que aparece é o 1 (azul), com 21,1% de tempo a mais, porém com demanda direta potencial de 91 passageiros. O último caminho é o 2 (verde) que tem demanda estimada de 76 passageiros e leva 31,6% de tempo de viagem a mais que o mínimo entre os terminais atendidos, porém foi incluído por possuir um baixo percentual de número de nós atendidos já presente nas outras linhas.

Para terminais mais distantes entre si, o número de trajetos possíveis aumenta bastante. A Figura 5.19 apresenta opções de trajetos adicionados ao Banco Itinerários com um limite de 10 rotas. A 10ª rota possui um tempo de viagem apenas 11,9% maior que a rota mais rápida e com potencial de atender mais demanda devido às verificações pré-inserção.

5.5.2 *Cálculo do Tempo de Processamento no Nível 2 para cada solução da fronteira do Nível 1*

No Nível 2, cada uma das soluções da fronteira de Pareto obtidas no Nível 1 serão complementadas com a definição dos itinerários das linhas entre os terminais através da busca pelo Genético Itinerários. Se o número de soluções na fronteira for alto, o tempo necessário para que a busca forneça resultados para todas pode ser muito elevado. Dessa forma, aplica-se um cálculo para determinar por quanto tempo o Genético Itinerários realiza a busca para cada solução da fronteira. Esse cálculo prioriza a busca em soluções que a princípio são mais equilibradas com relação aos custos dos usuários e dos operadores. O cálculo é feito com base nas Equações 5.9 e 5.10.

Para cada solução, é calculada a distância d pela Equação 5.10, que mede o quanto a solução está próxima do ponto que seria o ideal, ou seja, aquele que tem o valor mínimo para ambas as variáveis considerando os valores observados em todas as soluções. Conforme ilustrado na Figura 5.20, as menores distâncias representam soluções no meio da fronteira de Pareto que são mais promissoras a gerar soluções equilibradas após a definição dos itinerários finais. Distâncias maiores representam soluções extremas, que são mais inadequadas para implementação devido ao não atendimento das necessidades dos usuários ou que exigem uma frota muito elevada.

Figura 5.18: Exemplo de caminhos criados para o par de Terminais Vila Madalena e Vila Mariana, em São Paulo.

Fonte: Próprio autor no software QGIS. Mapas: Microsoft Bing Maps, HERE.

Figura 5.19: Exemplo de caminhos adicionados ao Banco de Rotas para o par de Terminais Vila Mariana – Pirituba, considerando um número máximo de 10 rotas.

Fonte: Próprio autor no software QGIS.

Dessa forma, a partir desta distância d , é aplicado um cálculo semelhante à probabilidade do ranking linear: as soluções da fronteira são inicialmente ordenadas de acordo com o valor de d e a pontuação N é designada a menor distância $r(1) = N$, e a pontuação 1 à solução de maior distância d , $r(N) = 1$, sendo N o número de soluções da fronteira do Nível 1. O percentual do tempo total T_s dedicado ao Nível 2 é então distribuído linearmente às soluções de acordo com sua pontuação, sendo o quociente entre a sua posição no ranking da distância d e a soma de todas as posições (Equação 5.9).

$$T_s = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^N r_i} \quad (5.9)$$

$$d = \sqrt{\left(\frac{f_{1s} - f_{1min}}{f_{1max} - f_{1min}}\right)^2 + \left(\frac{f_{2s} - f_{2min}}{f_{2max} - f_{2min}}\right)^2} \quad (5.10)$$

Onde:

T_s = proporção do tempo total dispendido no Nível 2 que a solução s vai consumir

r_i = posição do ranking da distância d

f_{1s} = fitness 1 do Nível 1 para a solução s [Equação 5.1]

f_{2s} = fitness 2 do Nível 1 para a solução s [Equação 5.2 removidas as penalidades]

N = número de soluções na fronteira de pareto do Nível 1

Figura 5.20: Distância d utilizada para o cálculo do tempo de processamento de cada solução no Nível 2.

Fonte: Adaptado de Talbi (2009).

Essa etapa processa as soluções da fronteira de Pareto das soluções válidas do Nível 1 com base em f_1 e f_2 (não penalizada, conforme explicado na 5.4.4.7) e atribui um tempo de processamento para a busca do Genético Itinerários.

5.5.3 Genético Itinerários

O conjunto de itinerários candidatos entre terminais e o tempo de processamento de cada solução no Nível 2 é usado como dado de entrada para a busca dos itinerários das linhas. No Nível 2, aplica-se também a meta-heurística Algoritmos Genéticos nesta busca, denominada nesta etapa de *Genético Itinerários*. A escolha da mesma meta-heurística de busca que a aplicada no Nível 1 advém do fato de sua estrutura ser facilmente adaptada, permitindo o reaproveitamento da implementação computacional. Além disso, os AGs foram aplicados para o PRTP com bons resultados. Nesta seção, são descritas as características do Genético Itinerários. Uma apresentação geral dos Algoritmos Genéticos como meta-heurística de busca pode ser verificada na seção 5.4.4.

Uma visão geral do Genético Itinerários do Nível 2 está apresentada na Figura 5.21. O Genético Itinerários recebe como dados de entrada o banco de itinerários candidatos entre terminais, os terminais, a rede viária e os parâmetros necessários. Os parâmetros de entrada são: tamanho da população, taxa de reprodução e mutação, quantidade máxima de gerações limite para reinicialização do algoritmo, número máximo de gerações a executar e tempo máximo limite de processamento.

Seu processamento inicia com a leitura dos parâmetros e a geração da população inicial de soluções aleatórias. Em seguida, são calculados os valores de *fitness* f_3 e f_4 de cada indivíduo, detalhados a seguir na subseção 5.5.3.2. As funções de *fitness* são diferentes no Nível 2 pois o tempo que seria necessário para calcular f_1 e f_2 torna a busca muito lenta e ineficiente, pois utilizar a rede viária aumenta muito a escala do problema, tornando a implementação da alocação tudo-ou-nada do pseudocódigo da Figura 5.10 um procedimento demorado. Após o cálculo das funções de *fitness*, a população é então ordenada e são selecionados pais para operadores de reprodução: cruzamento e mutação. Os valores de *fitness* são novamente calculados para a nova população e ela é ordenada.

As variáveis utilizadas para ordenamento da população se alternam entre f_3 (percentual de demanda não atendida) e f_4 (número estimado de transferências totais). O Genético Itinerários é executado até que um se atinja um critério de parada definido a priori, seja tempo total de processamento ou número máximo de gerações.

Nas próximas subseções são detalhadas as características do Genético Itinerários com base nos elementos de um AG.

Algoritmo 5: Genético Itinerários

Entrada: banco de itinerários candidatos entre terminais, parâmetros gerais do Genético Itinerários

Saída: fronteira de Pareto de soluções válidas em relação às funções objetivo z_3 e z_4 ; as linhas já possuem itinerário completo definido, mas ainda precisam de recálculo da frequência

Início Genético Itinerários

Ler Parâmetros do Genético Itinerários

Gerar População Inicial Aleatória

Calcular Funções de Aptidão f_3 e f_4 [chamar **CalculaFunçõesAptidãoGI**]

Ordenar População pelo Critério de Número de Transferências Estimado

Calcular Limites de Ranking Linear

continuar $\leftarrow$ verdadeiro

Enquanto continuar Faça

Selecionar Todos os Pais pelo Ranking Linear

Cruzamento Uniforme

Mutação

Calcular Funções de Aptidão f_3 e

Atualiza População com Elitismo do melhor indivíduo

Se (numeroDaGeracao mod 2 == 0) **Então** //geração par

Ordenar População pelo Menor Percentual de Demanda não atendida

Senão

Ordenar População Por Número de Transferências Estimado

Fim Se

Preparar Próxima Geração

finalizar $\leftarrow$ Verificação de critérios de finalização [tempo/número de gerações]

Se finalizar == verdadeiro **Então**

continuar $\leftarrow$ falso

Fim Se

Fim Enquanto

Fim Genético Itinerários

Início CalculaFunçõesAptidãoGI

Calcular Percentual de Nós atendidos

Calcular Percentual de Demanda não atendida pela rede estrutural

Calcular Número estimado de transferências totais na Rede Estrutural

Fim CalculaFunçõesAptidãoGI

Figura 5.21: Pseudocódigo do Genético Itinerários aplicado no Nível 2.

Fonte: Próprio autor.

5.5.3.1 Genético Itinerários: Representação do Cromossomo

A forma de representação de uma solução no Genético Itinerários é um vetor de inteiros com tamanho igual ao total de trechos de vias entre dois terminais existentes considerando todas as linhas da solução do Nível 1. Cada gene representa o caminho candidato através de sua posição no Banco Itinerários para aquele par de terminais. Esta forma de representação é apresentada na Figura 5.22 em que, para cada par de terminais das linhas que fazem parte da solução é definido o itinerário para ligar aquele par. Na Figura 5.22 os números apresentados para os genes na representação do Nível 2 são a título de exemplo.

Na Figura 5.22 a primeira linha do Banco Estrutural (1101010) faz parte da solução. Esta linha atende 3 terminais, e, portanto, possui dois trechos para os quais é preciso definir o itinerário. Assim, a primeira seta à esquerda da Figura 5.22 aponta para a representação do cromossomo do Nível 2 com dois valores (um para cada trecho entre dois terminais), que por sua vez representa o caminho candidato através de sua posição no Banco Itinerários para aquele par de terminais (representada por um inteiro de 0 até a (quantidade de itinerários no Banco Itinerários-1)).

Já a quarta linha do Banco Estrutural (1101010) atende 4 terminais, portanto, é necessária a definição de 3 itinerários (3 trechos definidos no Nível 2). Os valores 3-0-0 indicam, a título de exemplo, que a linha empregará o itinerário de número 3 do Banco para o trecho do primeiro ao segundo terminal, itinerário de número 0 para o trecho do segundo ao terceiro terminal e também de número 0 para o trecho do terceiro ao último terminal. A codificação se repete pois a ordem é definida para cada par de terminais diferentes. Ressalta-se que o número de trechos (entre dois terminais) é um atributo de cada linha e advém do número de terminais que ela atende conforme construção prévia do Banco Estrutural.

Figura 5.22: Representação do Cromossomo para o Genético Itinerários.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 5.22, a sexta linha do Banco Estrutural (1101010) faz parte da solução escolhida e atende a 2 terminais (por possuir 1 trecho preenchido com a informação “2” no detalhamento do Nível 2 da mesma figura), logo, apenas um trecho precisa de definição do itinerário a ser percorrido. A título de ilustração, caso esta linha representasse a ligação Terminal Vila Madalena – Terminal Vila Mariana, o itinerário definido seria o de número “2” (verde) ilustrado na Figura 5.18, pois o valor “2” representa o caminho candidato através de sua posição no Banco Itinerários para aquele par de terminais e a Figura 5.18 apresenta 3 caminhos adicionados para este par (itinerário “0”, “1” e “2”).

Na Figura 5.22, a quarta linha do Banco Estrutural (1101010) faz parte da solução e atende a 4 terminais (3 trechos conforme detalhamento indicado pela seta correspondente). Um exemplo das opções possíveis está indicado na Figura 5.23: 4 opções de trajeto para 1º trecho (Sacomã – Vila Mariana), 10 opções para o 2º trecho (Vila Mariana – Lapa) e 2 opções para o último trecho (Lapa – Pirituba). Cabe ressaltar que embora algumas opções de trajeto do 2º trecho (opções em azul) passem por outros terminais, a linha não adentra o terminal, fazendo apenas parada para embarque e desembarque rapidamente em uma plataforma externa ao terminal, conforme apontado na subseção 5.4.3. Ao todo são 80 opções possíveis de trajeto para esta linha estrutural ($4 \times 10 \times 2$).

Deve-se destacar que a complexidade de escolha do melhor itinerário para cada linha é alta devido ao número de possibilidades de conexões para transferências nos nós comuns com outras linhas. Cada itinerário implica em pontos de transferências diferentes, atendimento a pares OD diferentes, tempos de viagem distintos e outra necessidade de frequência para atendimento da demanda devido a trechos críticos diferentes.

5.5.3.1 Genético Itinerários: População Inicial, Viabilidade dos Indivíduos, Seleção

Para atender ao critério principal de diversificação na inicialização das soluções, para o Genético Itinerários é adotada a inicialização aleatória para a população inicial: para cada gene, é selecionado aleatoriamente qual trajeto do Banco Itinerários deve ser escolhido para aquele par entre terminais dentre todos os possíveis. Este número pode variar de 1 opção (caso exista apenas o caminho mais rápido como opção) até no máximo k rotas, definido como dado de entrada na construção do Banco Itinerários.

Figura 5.23: Exemplo de definição de itinerários possíveis para uma linha Term. Sacomã – Term. Vila Mariana – Term. Lapa – Term. Pirituba.

Fonte: Próprio autor no software QGIS.

Quanto à viabilidade, no Nível 2 não são avaliadas inviabilidades já que a busca não gera soluções inviáveis. No Nível 1 já são geradas soluções que são válidas quanto a conectividade dos terminais e que todos são atendidos. No Nível 2 são definidos os itinerários entre os terminais, logo, não há mudanças dos pontos extremos das linhas, nem dos terminais por onde passam. Enquanto que no Nível 1 busca-se o atendimento a todos os terminais, no Nível 2 a restrição de atendimento a todos os nós (que não são terminais) não é aplicada devido ao fato da rede Estrutural ser parte do sistema de transporte público por ônibus, portanto, existirão outras linhas locais nos bairros para o transporte até o sistema estrutural.

No Genético Itinerários, a estratégia de seleção adotada também é por Ranking Linear, após ordenamento alternado entre as funções de aptidão f_3 e f_4 .

5.5.3.2 Genético Itinerários: Aptidão (ou *fitness*)

A aptidão de um indivíduo corresponde à qualidade da solução. Novamente não são adotadas f_1 e f_2 novamente pois seu cálculo, conforme descrito na subseção 5.4.4.3, requer um tempo computacional muito elevado para o nível de desagregação da oferta e da demanda exigida para traçar os itinerários. Para o Genético Itinerários são adotadas duas funções de aptidão: f_3 , que corresponde ao percentual de demanda não atendida pela rede estrutural e f_4 , que é o total de transferências necessárias na rede.

Com a desagregação da oferta e da demanda entre terminais para as vias e nós, nem todos os nós são necessariamente atendidos pelas linhas estruturais. Assim, no Nível 2 parte da demanda não é atendida (no Nível 1, garante-se atendimento a todos os terminais e conectividade entre eles, logo, a demanda no nível de agregação entre terminais sempre é atendida). Dessa forma, adotou-se que, de modo a atender o máximo de demanda pelo sistema estrutural, a demanda não-atendida deve ser minimizada no Nível 2.

A avaliação dos custos dos usuários requer a alocação da demanda. Embora seja possível aplicar o método da alocação tudo-ou-nada como no Nível 1, optou-se por reduzir a complexidade do algoritmo de modo a aumentar a velocidade da busca e explorar mais regiões do espaço de soluções. Isso é feito simplificando as funções objetivo z_1 e z_2 para o número estimado de transferências totais na rede (f_3) e percentual de demanda não atendida pela rede estrutural (f_4). Embora não se inclua custos dos operadores nesta etapa, eles são calculados no Nível 3. As soluções da fronteira de Pareto com relação a f_3 e f_4 avançam ao Nível 3, onde as frequências das linhas são recalculadas e as funções objetivo z_1 e z_2 do problema são obtidas.

As funções de aptidão f_3 e f_4 estão apresentadas nas Equações 5.11 e 5.12. O procedimento de listagem de caminhos se restringe, no Nível 2, a apenas 1 transferência. Não se buscam caminhos com 2 ou mais transferências para reduzir o tempo de processamento e permitir explorar mais o espaço de soluções. Em contrapartida à simplificação, não é possível precisar qual o total de transferências da rede. Assim, adota-se que, para cada viagem não atendida, são adicionadas 3 transferências (Equação 5.12).

$$f_3 = p_{DNA} \quad (5.11)$$

$$f_4 = T_{1transfer} + d_{DNA} \cdot 3 \quad (5.12)$$

Onde:

p_{DNA} = percentual da demanda não atendida (2 ou mais transferências)
pela rede estrutural

$T_{1transfer}$ = total de transferências para as viagens com 1 transferência

d_{DNA} = demanda não atendida (2 ou mais transferências)

Adotou-se um ordenamento alternado entre f_3 e f_4 pois buscam-se soluções que atendam tanto mais demanda como redução de transferências neste Nível e a primeira não implica na segunda: uma solução pode atender um percentual alto da demanda, porém, muitas viagens requererem transferências.

Este conjunto de funções de aptidão direcionam as soluções para maximizar a quantidade de viagens atendidas na rede estrutural com o menor número possível de transferências. Os atributos de tempo de viagem, tempo de espera e frota são retomados na avaliação de z_1 e z_2 no Nível 3.

5.5.3.3 Genético Itinerários: Método de Reprodução: Cruzamento e Mutação

No Genético Itinerários o operador de cruzamento adotado é o Uniforme, onde a chance de herdar cada gene de cada pai é 50%, adequado à representação do cromossomo adotada. Já a mutação é um operador que procura evitar que a busca fique estagnada em ótimos locais. No Genético Itinerários, o operador de mutação sorteia indivíduos para mutação com base em uma probabilidade p_m . Caso o indivíduo seja solucionado, a mutação modifica 1 gene escolhido aleatoriamente, alterando o itinerário entre um par de terminais de uma linha para outro dentre os possíveis. Com a mutação, itinerários novos são inseridos (ou removidos) nos indivíduos.

5.5.3.4 Genético Itinerários: Atualização da População, Exploração do Espaço de Soluções e Critério de Parada

No Genético Itinerários se mantém a mesma estratégia de atualização da população: toda a população é substituída pelos descendentes, exceto pelo melhor indivíduo da geração atual, que é mantido, de forma a continuar a evolução da população sempre para melhores soluções.

Quanto à exploração do espaço de soluções, o Genético Itinerários também adota substituição de clones por novos indivíduos aleatórios e a reinicialização da população. Toda vez que um filho ou mutante for gerado é feita uma verificação se o indivíduo novo é um clone. Caso seja, este é substituído por um indivíduo novo inicializado aleatoriamente.

A reinicialização auxilia a saída de ótimos locais no processo de busca. No Genético Itinerários, se o valor de f_4 estiver sem melhora por um número pré-determinado de gerações então todos os indivíduos são reinicializados aleatoriamente para formar uma nova população inicial e continuar a busca. Como a reinicialização permite a continuidade da execução do algoritmo indefinidamente, é necessário a adoção de critérios de parada para finalizar a busca. No Genético Itinerários, são adotados dois critérios: número de gerações e tempo total de processamento.

5.5.3.5 Genético Itinerários: Saída: Fronteira de Pareto

A saída do Nível 2 são soluções para rede estrutural com a quantidade de linhas definida e os itinerários das linhas no sistema viário que atendem o maior volume de viagens com transferências minimizadas. Para tal, durante a execução do algoritmo são armazenadas todas as soluções. Ao final, obtém-se uma Fronteira de Pareto das melhores soluções com relação às funções de aptidão f_3 e f_4 , que avançam ao Nível 3 para cálculo das frequências e avaliação das funções objetivo z_1 e z_2 . São armazenadas todas as soluções pois garante que serão avaliadas todas as soluções para elaborar a fronteira de Pareto.

Adicionalmente, um argumento importante para se trabalhar com duas funções objetivo e selecionar um conjunto das melhores para o Nível 3 é que no Nível 2 não são avaliados todos os componentes de z_1 e z_2 , desta forma, uma solução que possua um percentual de não-atendimento alto pode ter um custo generalizado médio baixo. Ao mesmo tempo que podem surgir soluções com alto percentual de demanda atendida, porém com um custo de usuários muito elevado. Ambas as soluções podem fazer parte de um elenco de soluções a ser avaliadas para tomada de decisão final por planejadores de transporte.

5.6 Projeto da Rede Estrutural (Nível 3): Alocação final e cálculos de custo generalizado e frota total

No Nível 3 as frequências das linhas das soluções de saída do Nível 2 são calculadas após alocação das viagens e z_1 (custo generalizado) e z_2 (frota) são calculados. Neste nível não é realizada nenhuma busca por melhores soluções.

O fluxograma do procedimento proposto no Nível 3 é apresentado na Figura 5.24. O Nível 3 recebe como dados de entrada os terminais, nós, links e tempos de viagem, a OD agregada aos nós e as soluções da fronteira de Pareto obtidas no Nível 2 para percentual da demanda não

atendida pela rede estrutural e número total de transferências estimada. Para cada solução é realizado o procedimento de alocação *Extended Transit Assignment* do software EMME, um algoritmo de alocação baseado na teoria das estratégias ótimas (SPIESS; FLORIAN, 1989). Com a demanda dos trechos críticos estimados para todas as linhas é recalculada a frequência com base na Equação 5.6.

Pelo fato de a mudança nas frequências alterar os melhores caminhos entre os pares OD na rede, este processo é iterativo, ou seja, a alocação precisa ser refeita para refletir as escolhas dos usuários com base nas novas frequências calculadas. Além disso, nesta etapa se atribui uma frequência mínima de operação para as linhas, de modo a atender a restrição descrita na subseção 3.5.1. Após algumas iterações os carregamentos máximos convergem e a frequência das linhas não se altera.

Figura 5.24: Fluxograma do processamento no Nível 3.

Fonte: Próprio autor.

Por fim são calculados os valores dos custos dos usuários e operadores, de modo a representar z_1 e z_2 (Equações 4.1 e 4.2). Deve-se ressaltar que, pelo fato da Rede Estrutural ser parte de um sistema de transporte público por ônibus, nem toda demanda é atendida pela Rede Estrutural, justamente por esta troncalizar a oferta e não atender todos os pontos de parada do sistema. Isso decorre que soluções com baixos valores de z_1 podem representar atendimento

baixo de demanda pela rede estrutural. Dessa forma, para cada solução também é calculado o percentual da demanda atendida pela rede estrutural e o valor de z_1 (que representa o custo dos usuários total) é dividido pela demanda atendida pela rede estrutural. A seguir é apresentado o algoritmo de alocação utilizado no software EMME e seu uso na metodologia deste trabalho.

5.6.1 EMME, *Extended Transit Assignment* e Cálculo das Frequências

EMME (*Equilibre Multimodal, Multimodal Equilibrium*) é um software de modelagem de transporte da empresa INRO e foi desenvolvido pelo Centre for Research on Transportation (CRT) da Universidade de Montreal na década de 70 (HILDEBRAND; HÖRTIN, 2014). Ele é um software de modelagem e análise macroscópica de sistemas de transporte urbana, regional e nacional e é usado por planejadores de transporte de grandes cidades no mundo. A escolha do uso do software EMME nesta pesquisa se deve ao seu uso em mais de 85 países, métodos de alocação avaliados pela comunidade científica e na sua disponibilidade para esta pesquisa por meio de uma licença acadêmica cedida pela empresa INRO. Além disso, outros estudos também utilizaram os métodos de alocação implementados no software no PRTP (POORZAHEDY; SAFARI, 2011; CIPRIANI; GORI; PETRELLI, 2012).

A alocação de transporte público do EMME é baseada na teoria de estratégias ótimas proposta por Florian e Speiss (1989) e consiste na busca pela minimização do tempo total de viagem que contém: tempo de espera, tempo de viagem auxiliar (até a chegada ao ponto de embarque/desembarque), tempo de embarque e tempo dentro do veículo (HILDEBRAND; HÖRTIN, 2014). Os componentes do tempo de viagem são penalizados em comparação ao tempo dentro do veículo.

As diferentes opções para a realização das viagens entre um par OD são salvas em um conjunto de estratégias. Uma estratégia pode ser expressa como um conjunto de regras que permitem o passageiro tomar decisões ao longo da sua viagem e chegar ao destino final (INRO, 2017).

A alocação de transporte público *Extended transit assignment* (alocação de transporte público estendida) aplica uma alocação de transporte público baseada em frequências usando estratégias ótimas (INRO, 2017). O aprofundamento nos métodos de alocação diverge do problema proposto e está além do escopo deste trabalho, portanto, para mais detalhes acerca do método de alocação utilizado pelo EMME o leitor é referido ao EMME Modeller Manual Volume 2 (INRO, 2017) e ao trabalho de Hildebrand e Hörtin (2014).

O cálculo das frequências das linhas utiliza a alocação *Extended transit assignment* da versão 4.3.7 com base no descrito no pseudocódigo da Figura 5.25. Antes da aplicação do método de alocação, é atribuída uma frequência mínima para todas as linhas. Em seguida, a alocação e posterior recálculo das frequências é aplicado por um número de iterações especificado.

Algoritmo 6: Recálculo da Frequência e Indicadores (Nível 3)

Entrada: soluções do Nível 2, terminais, *links* (e tempos de viagem), nós, OD agregada (nós), total de iterações da alocação

Saída: soluções com frequência calculadas para todas as linhas, custo generalizado médio, frota total, percentual de demanda atendida pela rede estrutural

Início RecálculoFrequênciaIndicadores

Para cada solução Nível 2 **Faça**

Adicionar solução no EMME

Atribuir Frequência mínima para todas as linhas

Para nIteração = 1 até totalDeIterações

Alocar Demanda usando *Extended Transit Assignment*

Calcular Carregamento Máximo das Linhas

Recalcular frequências

Atribuir frequência mínima

nIteração+=1

Fim Para

Calcular custo generalizado médio

Calcular frota total

Calcular percentual da demanda não atendida pela rede estrutural

Fim Para cada

Fim RecálculoFrequênciaIndicadores

Figura 5.25: Pseudocódigo do cálculo da frequência e demais indicadores usando extended transit assignment do EMME.

Fonte: Próprio autor.

Por fim, são calculados o custo generalizado médio por passageiro (divisão da Equação 4.1 pelo total de demanda atendida), a frota total (Equações 5.6, 5.7 e 5.8) e o percentual de demanda atendida/não atendida pela rede estrutural. Ao final do processamento do Nível 3 é gerado um conjunto de soluções para o projeto da Rede Estrutural de transporte público por ônibus. No próximo Nível 4, os itinerários das linhas são detalhados para sequência de pontos de parada e faz-se uma avaliação conjunta das redes estruturais geradas no Nível 3 com linhas locais da rede tronco-alimentada existente na região.

5.7 Projeto da Rede Estrutural (Nível 4): Detalhamento dos Itinerários para sequência de pontos de parada e avaliação conjunta com rede local existente

A rede estrutural de transporte público por ônibus é um componente do sistema tronco-alimentado. Ela deve ser operada em conjunto com outros sistemas locais de linhas que complementam a rede estrutural e distribuem a demanda dos terminais aos bairros próximos. De fato, a agregação da demanda aos nós aplicada no Nível 1 (Figura 5.4) reduz a precisão da representação das viagens no sistema viário.

O objetivo final do Nível 4 é apresentar uma avaliação das redes estruturais com frequências e itinerários resultantes do Nível 3 operando em conjunto com linhas locais já existentes. Nesta etapa propõe-se que sejam avaliados os trajetos para a matriz de viagens entre pontos de parada inicial (sem agregação) com uma representação da oferta mais fiel ao sistema real: o itinerário das linhas, até então definido como sequência de nós da rede estrutural, passa a ser uma sequência de pontos de parada atendidos. Além disso, todas as vias onde os usuários podem caminhar entre os pontos de parada para transferências são representadas neste modelo. O maior nível de desagregação e fidelidade ao sistema de transportes real permite obter valores mais precisos de indicadores de qualidade da rede.

A sequência de procedimentos proposta no Nível 4 está apresentada na Figura 5.26. Como dado de entrada são recebidas as soluções após o cálculo das frequências no Nível 3. Para se detalhar os itinerários como sequência de pontos de parada, para todos os trechos entre nós estruturais é definida a sequência de pontos de parada a partir do sistema viário estrutural detalhado da região.

Com os itinerários das rotas estruturais definidos como sequência de pontos de parada, adiciona-se as linhas locais e se representa o sistema de transporte público através do GTFS (*General Transit Feed System*) (GOOGLE, 2019). Com a adição do sistema viário detalhado através do *Open Street Map* (OSM, 2020), é realizado um roteamento de menor tempo usando a ferramenta *Open Trip Planner* (OTP, 2019), que fornece como resultado o tempo total de viagem e o número de transferências para a realização de todas as viagens na rede conjunta estrutural e linhas locais. A seguir são detalhados os procedimentos propostos nesta etapa do método.

Figura 5.26: Fluxograma dos procedimentos no Nível 4.

Fonte: Próprio autor.

5.7.1 Definição da Sequência de Pontos de Parada para cada Link Estrutural e Detalhamento do Itinerário das Linhas Estruturais

No sistema de transporte público por ônibus, os usuários acessam o sistema por meio de embarque e desembarque em pontos de parada. Até o Nível 3, as linhas estruturais propostas são definidas como sequência de nós do sistema viário estrutural, sendo uma simplificação do sistema real. De modo a avaliar se de fato a linha estrutural passará ou não em um ponto de parada acessível ao usuário é preciso definir a sequência de pontos de parada da linha. Esta etapa é de grande importância para tomada de decisão e implementação do sistema e não é explorada na literatura científica. Os passos adotados para a definição da sequência de pontos de parada de cada linha são:

- Criar um viário provável de passagem para cada *link* da rede estrutural;
- Aplicar um *buffer* de pequena distância para cada viário provável;

- Selecionar os pontos de parada dentro do *buffer*;
- Ordenar os pontos pela distância a partir da origem do *link* e armazenar a sequência em uma estrutura de dados;
- Para cada linha, agregar os pontos de parada de todos os *links* conforme definidos anteriormente e eliminar os duplicados;
- Estimar horário de passagem nos pontos com base na interpolação do tempo de viagem total do link e do número de pontos por *link*;

Para a criação do viário provável, é avaliado o sistema viário estrutural que liga os nós estruturais e adota-se o trajeto mais curto. Um exemplo de aplicação deste procedimento está apresentado na Figura 5.27. Na parte superior da Figura 5.27 são indicados os *links* da rede estrutural em magenta e o sistema viário estrutural em verde. Na parte inferior, em azul está o viário provável de todos os *links* após aplicação de um *buffer* de 50 metros. Assim, os pontos de parada do trecho 315-310 são aqueles contidos neste *buffer* de 50 metros.

De modo a ilustrar a aplicação para um linha estrutural com itinerário definido como sequência de nós, a Figura 5.28 mostra os pontos de parada atendidos pela linha cuja sequência de nós estruturais é 279-280-284-70-71. Nota-se que na sequência de pontos de parada estão inclusos pontos que ficam do outro lado da via pois estes são incluídos no *buffer*, no entanto, o efeito desta inclusão é baixo já que a distância de caminhada entre eles é pequena. A estratégia de *buffer* adotada é eficiente pois a obtenção da sequência de pontos de parada é direta e de baixo custo computacional.

Por fim, estima-se o horário de passagem da linha no ponto com base na distribuição linear do tempo de viagem do *link* nos trechos entre pontos de parada. Ao final da aplicação destes procedimentos todas as linhas estruturais propostas são representadas pelas sequências de pontos de parada atendidos, pela sua frequência de operação e horário de passagem estimado em cada ponto.

Esta etapa exige um conhecimento da rede viária da região, que pode requerer um estudo específico para sua definição.

Figura 5.27: Exemplo do viário provável no sistema viário real que representam os *links* estruturais, exemplo para região da Zona Leste, São Paulo.

Fonte: Próprio autor no software QGIS. Sistema Viário Estrutural (VEIO): Prefeitura de São Paulo (PMSP, 2015).

Figura 5.28: Pontos de parada atendidos para a linha com sequência de nós 279-280-284-70-71 a partir da metodologia aplicada no Nível 4.

Fonte: Próprio autor no software QGIS.

5.7.2 Roteamento usando OpenTripPlanner (OTP)

Uma dificuldade encontrada foi como encontrar os valores de z_1 e z_2 para o sistema tronco-alimentado completo formado pela união das linhas estruturais propostas mais as linhas locais já existentes na área de estudo. Como o detalhamento do itinerário modifica o tempo de ciclo estimado da linha, o recálculo de z_2 é recomendado. A princípio poderia ser igualmente

usado o software EMME, no entanto, o esforço de representação da oferta e do sistema viário no nível de desagregação de interesse nesta etapa seria muito elevado para o problema delimitado neste trabalho no Capítulo 4.

Dessa forma, para avaliar a rede conjunta das linhas estruturais propostas e da rede local de linhas existente com representação desagregada da demanda e da oferta, propõe-se o uso da ferramenta *OpenTripPlanner* (OTP). O OTP é uma família de projetos de software aberto que fornecem informação aos passageiros e de análise de redes de transporte (OTP, 2019). O OTP vem sendo usado pela comunidade científica (BOISJOLY; EL-GENEIDY, 2016; WIDENER *et al.*, 2017) para avaliação de indicadores de acessibilidade a oportunidades. Apesar da ferramenta não fornecer todos os componentes de tempos de viagem necessários ao cálculo de z_1 , é possível avaliar indicadores representativos como tempo total de viagem e número estimado de transferências na rede completa.

Ele permite encontrar caminhos na rede de transporte público combinando ônibus, sistemas baseados em trilhos e caminhada para acesso e egresso dos pontos de parada a partir de dados de entrada no formato padrão aberto do *OpenStreetMap* para o sistema viário e dados da rede de transporte público no GTFS (*General Transit Feed System*). O *OpenStreetMap* é um projeto desenvolvido por uma comunidade voluntária que contribuem com dados sobre vias por todo o mundo cujos dados são abertos e qualquer pessoa tem a liberdade de usá-los (OSM, 2020). O GTFS é um formato de representação padronizado de sistemas de transporte público utilizado na plataforma *Google Transit* (GOOGLE, 2019) que vem sendo adotado pela comunidade científica para diversos estudos (NASSIR *et al.*, 2011; ARBEX; ALVES; GIANNOTTI, 2016; BOK; KWON, 2016; FARBER; FU, 2017; KUMAR; KHANI; HE, 2018). O fato dos dados de entrada serem padronizados é um aspecto que facilita o uso do OTP.

A partir dos dados inseridos no OTP é gerado um grafo que permite realizar solicitações de caminhos no sistema de transporte público (entre um dado endereço de origem e outro de destino) que fornece como resposta uma sequência de linhas a serem utilizadas, pontos de embarque e desembarque, tempo total de viagem e número de transferências necessárias. É possível utilizar uma interface de usuário, como exemplificada na Figura 5.29, ou automatizar as requisições de caminhos por meio de *scripts*.

Automatiza-se o processo de solicitação de caminhos para elaborar uma matriz de tempos de viagens e número de transferências entre zonas pré-definidas. Ao final, obtém-se os valores dos tempos totais de viagens e número total de transferências na rede estrutural e local operando conjuntamente.

Figura 5.29: Exemplo da interface do OTP para um itinerário na rede de transporte público.

Fonte: Sistema *OpenTripPlanner*.

Apesar das limitações existentes com esta abordagem (não ser possível estimar z_1 ou avaliar o carregamento dos dois sistemas) é uma alternativa de análise expedita que apresenta as diferenças entre a situação atual e uma nova rede projetada para os indicadores tempo de viagem e número de transferências, demonstrando o potencial de melhoria do serviço ao usuário da aplicação da metodologia proposta neste trabalho. A vantagem de uso de um detalhamento como permitido pela base de vias do OpenStreetMap é que o OTP busca itinerários completos com definição de trechos de caminhada usando um sistema viário detalhado. Para tomada de decisão, recomenda-se, no entanto, uma avaliação detalhada da interação dos dois sistemas alocando-se as viagens às linhas estruturais e locais.

5.8 Considerações finais do capítulo

Este capítulo apresentou a metodologia proposta para o projeto da rede estrutural de transporte público por ônibus. O método recebe como dado de entrada dados de bilhetagem eletrônica e GPS da frota e dados sobre o sistema de transporte atual. O método é baseado em

4 Níveis que buscam dividir o problema em problemas menores de forma a encontrar as melhores soluções para a rede estrutural.

No Nível 1, são definidas quantas linhas fazem parte da rede e qual a sequência de terminais atendidos por elas. No Nível 2, o itinerário entre os terminais atendidos é especificado. No Nível 3 essas melhores soluções têm a demanda alocada às linhas através do uso da alocação *Extended transit assignment* do software EMME e o custo generalizado médio e a frota total são calculados após definição final das frequências de operação das linhas. Por fim, no Nível 4, os itinerários das linhas são detalhados para sequência de pontos e é feita uma avaliação do funcionamento conjunto da rede estrutural proposta com a rede local existente na região de estudo através da plataforma aberta *OpenTripPlanner*.

No próximo capítulo são apresentados os resultados para a aplicação da metodologia no estudo de caso da rede da madrugada da cidade de São Paulo e da análise de sensibilidade realizada utilizando dados de demanda de diversos dias para avaliação da robustez das redes geradas pelo algoritmo.

6 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados de experimentos computacionais da aplicação da metodologia para o projeto de redes estruturais de transporte público proposta nesta tese. Inicialmente são apresentadas informações sobre a implementação computacional, as características gerais do estudo de caso proposto, seguida da apresentação dos resultados para um conjunto de quatro análises de sensibilidade realizadas: variações nos dados de entrada com relação (i) ao número e características das linhas, (ii) ao número de terminais, (iii) às possibilidades de construção dos itinerários e (iv) à demanda. Os principais resultados e conclusões obtidos no estudo de caso são destacados em *itálico* para posterior resumo na última seção deste capítulo.

No contexto desta tese, o termo “análise de sensibilidade” é interpretado a partir da definição de Saltelli *et al.* (2002): “o estudo de como a incerteza no resultado de um modelo pode ser repartida para diferentes fontes de incerteza nos dados de entrada do modelo” (tradução livre). Dessa forma, objetiva-se analisar e melhor compreender as relações existentes entre as melhores soluções encontradas e os parâmetros de entrada do modelo.

Estuda-se como os parâmetros de entrada do método proposto influenciam e modificam as soluções encontradas. Além de apresentar soluções para o problema do projeto de redes estruturais de transporte público por ônibus, as análises de sensibilidade realizadas oferecem/proporcionam aos planejadores de transporte ferramentas de auxílio ao processo de planejamento, indicando, por exemplo, as ligações recomendadas entre terminais a partir do conjunto das melhores soluções obtidas.

6.1 Implementação Computacional

As análises dos dados de GPS e bilhetagem eletrônica foram realizadas utilizando a linguagem Python, com adição das bibliotecas Numpy, Pandas e Geopandas. Para as agregações da matriz de viagens foi utilizado o software QGIS. A construção dos Bancos de rotas e as implementações de busca no Nível 1 e 2 foram implementadas na linguagem C++14. Para o Nível 3 foi criado um script no Python para acionar as funções do software EMME. Para o detalhamento dos itinerários no Nível 4 foi utilizado o software QGIS, e para avaliação conjunta da rede com as linhas locais foi utilizado o OpenTripPlanner. Finalmente, para elaboração dos gráficos foi utilizada a linguagem Python através da biblioteca Seaborn.

Para as análises de sensibilidade da subseção 6.3.1 foram utilizados como hardware três computadores Intel® Core i7 3770. Já nas análises de sensibilidade correspondentes às subseções 6.3.2, 6.3.3 e 6.3.4 foi utilizado um Intel® Xeon® CPU E5-2620.

6.2 Estrutura Geral do Estudo de Caso e Dados de Entrada

Nesta seção apresenta-se a contextualização do estudo de caso, que compreende a definição do sistema viário estrutural, a matriz origem-destino obtida a partir dos dados de bilhetagem eletrônica e a descrição das análises de sensibilidade realizadas.

6.2.1 Noturno: Rede de Ônibus da Madrugada

Em fevereiro de 2015, em São Paulo, começou a funcionar um novo serviço denominado “Noturno: Rede de Ônibus da Madrugada”, que é uma rede de linhas de ônibus estruturais e locais que atendem todas as regiões da cidade de São Paulo no período da 0h às 4h. Com ela, é possível, de acordo com a SPTrans (2017), “sair da zona sul e chegar aos bairros mais distantes de outras regiões da cidade, fazendo integrações preferencialmente em terminais e locais de conexão. A rede ‘Noturno’ atenderá os usuários do Metrô, passando junto ou próximo das estações”. Essa era uma demanda da população, uma vez que 44,7% dos usuários das 12 linhas do projeto piloto do Noturno não utilizavam transporte público durante a madrugada antes do início do funcionamento do mesmo (PMSP, 2017b).

Uma avaliação de indicadores da rede da madrugada foi apresentada por Arbex e Cunha (2019) na qual é apresentada a metodologia de estimação de matrizes origem-destino utilizada neste estudo de caso e um comparativo antes-e-depois da implementação da nova rede. Os autores comparam características da demanda e da oferta de transportes no período da madrugada antes e depois da implantação da nova rede em 2015, evidenciando um aumento significativo da acessibilidade promovida pela rede e também da demanda de viagens.

Nesse contexto, o estudo de caso aqui proposto para aplicação da metodologia desta pesquisa corresponde ao projeto de uma rede estrutural de transporte público por ônibus que atenda toda a cidade de São Paulo, neste período da madrugada (meia-noite às 4h). A rede Noturno possui 49 linhas estruturais, interligando terminais, que operam com intervalos fixos de 15 minutos e 100 linhas locais, que atendem bairros a partir dos terminais, com intervalos de 30 minutos entre as partidas. São utilizados 32 terminais para início e término dos trajetos

de todas as linhas. As linhas estruturais se originam e se destinam a terminais distintos. Já as linhas locais, são todas linhas circulares com origem e destino em um mesmo terminal.

Este estudo de caso compreende a determinação de uma nova rede otimizada para esse transporte na madrugada.

6.2.2 *Dados de Entrada: Rede Viária e Matriz OD*

A rede viária estrutural aqui modelada para definição dos itinerários e agregação da demanda é composta de 601 *links* bidirecionais (1202 *links* unidirecionais), 343 nós e 32 terminais e está representada na Figura 6.1. Utilizou-se como base para sua elaboração a definição do VEIO (“Viário Estrutural de Interesse do Ônibus”) definido pela Prefeitura de São Paulo (PMSP, 2017a) com as vias adequadas para circulação de linhas de ônibus estruturais. Caso não houvesse a disponibilidade desta informação, poderia ter sido elaborada esta seleção de vias com base nos seguintes critérios principais: hierarquia viária (preferencialmente vias de trânsito rápido e arteriais), presença de faixas exclusivas e corredores exclusivos. A esse viário estrutural VEIO foi aplicado o procedimento descrito anteriormente na seção 5.3 para definição do viário estrutural.

Observa-se na Figura 6.1 uma distribuição homogênea dos terminais na cidade e uma maior concentração de vias estruturais nas áreas centrais da cidade. A Tabela 6.1 relaciona os 32 terminais utilizados nesta rede, com seu nome, localização e identificação.

Nas análises de sensibilidade que são apresentadas nas seções deste capítulo foi utilizada a matriz de demanda estimada a partir da bilhetagem eletrônica utilizando dados das transações ocorridas na madrugada do dia 27/10/2017, de quinta para sexta-feira, por representar um volume de viagens representativo para a semana. Apesar de haver uma maior variação da demanda nas madrugadas ao longo dos dias da semana quando comparado com o pico da manhã, o volume de embarques de quinta para sexta-feira é próximo da média semanal. Ressalta-se que idealmente seja utilizada uma matriz obtida através da análise de um período maior, como de um mês típico. Esta proposta está inclusa nas recomendações de trabalhos futuros.

Ao todo, para o período de 00h00-03h59, foram estimadas 29.744 viagens. As viagens são formadas pela concatenação de bilhetagens no sistema de ônibus. Com base no apresentado na seção 5.2 e no APÊNDICE C, as viagens possuem resolução espacial com informação do ponto de parada estimado de embarque e desembarque final, que possibilita a elaboração da

matriz origem-destino de viagens entre pontos de parada para utilização como dado de entrada. Para a aplicação da metodologia proposta nesta pesquisa a este estudo de caso é utilizada a faixa horária crítica de 00h00 à 01h00, que corresponde a 23.723 viagens.

6.2.3 *Agregação da Matriz de Viagens entre Pontos de Parada aos Nós*

A partir da matriz de viagens entre pontos de parada aplicam-se as agregações da matriz aos nós da rede estrutural (conforme detalhado na subseção 5.4.1) e em seguida entre os terminais (subseção 5.4.2), parte inicial do fluxograma do Nível 1 na Figura 5.4. Inicialmente, a matriz de viagens OD entre pontos de parada é agregada aos nós da rede estrutural (de aproximadamente 20 mil pontos de parada para 343 nós) aplicando-se Voronoi, gerando uma matriz com 3,01% de pares com demanda não-nula. Posteriormente, a matriz de demanda entre os 343 nós estruturais é agregada às áreas de contribuição dos 32 terminais (vide metodologia descrita nas subseções 5.4.1, 5.4.2 e Figuras 5.5, 5.6 e 5.7). Após a agregação aos 32 terminais, a matriz de viagens apresenta 45,8% de pares com demanda não-nula entre terminais distintos.

A matriz de viagens é apresentada numericamente na Figura 6.2 e espacialmente na Figura 6.3. Na Figura 6.2, tem-se que, apesar da agregação realizada, ainda sim muitos pares OD entre áreas de contribuição de terminais tem demanda nula, em virtude do número reduzido de viagens na madrugada quando comparado com a demanda durante o dia. Além disso, alguns pares OD são desproporcionalmente maiores que os demais e agregam maior parte da demanda de viagens. Desta forma, algumas ligações entre terminais são importantes para as soluções serem de boa qualidade, atendendo aos principais pares OD de forma eficiente. Observa-se também uma grande concentração de viagens com origens nas áreas representadas pelos terminais Pinheiros (ID 31) e Vila Mariana (ID 17) com destino aos terminais da Zona Sul (IDs 4, 5, 6, 7, 8 e 9), assim como uma maior quantidade de viagens chegando nos terminais mais periféricos.

6.3 **Análises de Sensibilidade**

Conforme mencionado no início deste capítulo, foram realizadas quatro análises de sensibilidade e seus resultados são apresentados nesta seção. Os parâmetros escolhidos para serem avaliados estão relacionados:

- (i) ao número e características das linhas (número de linhas na rede, suas extensões máximas e o desvio máximo do tempo de viagem em relação ao tempo mais rápido) [subseção 6.2.1];
- (ii) ao número de terminais [subseção 6.2.2],
- (iii) às possibilidades de construção dos itinerários (número total de itinerários incluídos no Banco Itinerários) [subseção 6.2.3] e
- (iv) à demanda (matrizes de demanda de diferentes dias) [subseção 6.2.4].

Optou-se por considerar os parâmetros com maior influência direta sobre as questões envolvidas nas restrições do projeto de rede: primeiramente, qual o número de linhas a serem operadas na rede (restrição 3.5.8)? Qual deve ser a extensão das linhas (restrição 3.5.5)? Como deve ser a linearidade das rotas (restrição 3.5.6)? Qual deve ser o itinerário destas linhas e suas frequências de operação (restrição 3.5.1)? O quanto da demanda deve ser atendida pela rede estrutural (restrição 3.5.7)? O objetivo dessas escolhas de parâmetros para a análise de sensibilidade é demonstrar e discutir como o algoritmo proposto consegue resolver o problema apresentado e também auxiliar a tomada de decisão de planejadores de transporte oferecendo diretrizes sobre as ligações entre terminais e itinerários mais recomendados.

Os experimentos realizados são detalhados na Tabela 6.2. Nela são apresentados os parâmetros de entrada utilizados no algoritmo de solução para cada análise de sensibilidade. Os parâmetros dos Genéticos adotados foram selecionados após testes iniciais da metodologia que incluíram variações do tamanho da população, da taxa de mutação, do tempo de processamento e da quantidade máxima de gerações para reinicialização tanto no Genético Estrutural como no Genético Itinerários.

Tabela 6.1: Localização e identificação dos Terminais do estudo de caso.

ID Terminal	ID Nó	Nome	Latitude	Longitude
1	18	Vila Madalena	-23,546421	-46,69088
2	41	Butantã	-23,571883	-46,708667
3	71	Guaianazes	-23,542341	-46,415205
4	73	Capelinha	-23,654669	-46,762517
5	75	Campo Limpo	-23,630977	-46,772347
6	76	João Dias	-23,643879	-46,733418
7	77	Jd. Ângela	-23,69009	-46,773693
8	78	Guarapiranga	-23,66872	-46,734493
9	85	Grajaú	-23,735845	-46,696248
10	94	Santo Amaro	-23,654364	-46,71204
11	106	Jabaquara	-23,646779	-46,639593
12	142	Pirituba	-23,486633	-46,726513
13	153	Vl. Nova Cachoeirinha	-23,474732	-46,669521
14	158	Casa Verde	-23,495617	-46,66165
15	171	Tucuruvi	-23,479699	-46,603304
16	179	Santana	-23,502601	-46,6248
17	215	Vila Mariana	-23,588671	-46,634517
18	218	Sacomã	-23,603093	-46,602659
19	237	Barra Funda	-23,526012	-46,666931
20	244	Lapa	-23,520212	-46,699852
21	246	Pq. D. Pedro II	-23,546704	-46,630206
22	273	Sapopemba	-23,614659	-46,50123
23	274	São Mateus	-23,612664	-46,475885
24	279	Cid. Tiradentes	-23,583513	-46,407813
25	285	Carrão	-23,558295	-46,523098
26	293	Aricanduva	-23,528698	-46,554535
27	298	Penha	-23,51912	-46,54679
28	313	A.E. Carvalho	-23,517825	-46,475858
29	318	São Miguel	-23,491697	-46,43475
30	324	Itaquera	-23,543111	-46,470912
31	335	Pinheiros	-23,566309	-46,701685
32	341	Belém	-23,54308	-46,589907

Figura 6.1: Links e Nós do Viário Estrutural modelado.

Fonte: Próprio autor.

ID Origem/Destino	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	Total Origens	
1		140,6	2,4	50,0	104,9	28,6	14,3	2,4	7,1		26,2	14,3	50,0	11,9	14,3	21,4	62,0	14,3	21,4	45,2	102,5	11,9	2,4		2,4	2,4	4,8	2,4	9,5	2,4	38,1	2,4	812,5	
2	4,8			31,0	88,2	23,8	2,4	2,4	2,4		9,5	2,4	2,4				2,4				9,5								2,4		14,3		197,8	
3																					2,4		4,8	150,2		2,4			97,7	21,5			278,9	
4					100,1	28,6	181,2	7,2	9,5	11,9	2,4		2,4				2,4				2,4										2,4		350,4	
5		21,4		78,7		9,5	14,3																								2,4		126,3	
6		52,4	2,4	343,3	38,2		102,5	76,3	26,2	2,4	21,5			2,4				2,4			2,4									2,4	7,1		681,7	
7				52,5		7,2		2,4	4,8	4,8	4,8										2,4										4,8		83,4	
8				50,1		4,8	145,4		9,5	11,9	4,8																				4,8		231,2	
9		4,8		26,2			131,1	69,1		16,7	119,2						2,4				2,4											2,4		374,1
10	2,4	16,7		181,2	59,6	69,1	228,8	97,7	305,1		64,3	2,4			2,4	2,4	14,3	2,4			9,5			2,4					2,4		11,9		1074,9	
11	2,4	4,8		21,4	21,5	7,2	14,3	7,1	81,0	9,5			2,4				9,5	28,6			9,5				2,4				2,4	2,4	2,4		228,7	
12													88,2								59,6	2,4											150,2	
13											19,1			16,7	2,4	14,3			2,4	19,1	9,5				2,4								85,8	
14		2,4					2,4						62,0			14,3	2,4		9,5	4,8													97,7	
15													9,5			19,1					11,9					2,4						4,8	47,6	
16			2,4		9,5				2,4	2,4	2,4	2,4	212,2	59,6	326,5		2,4		2,4	7,1	23,8				2,4	9,5	16,7	7,1	11,9	7,2	2,4	19,0	731,6	
17	14,3	52,4	2,4	181,2	157,3	76,3	138,3	83,4	171,6	19,1	176,3	4,8	26,2	11,9	11,9	11,9		45,2	26,2	26,2	107,2	23,8	2,4	7,1	7,1	2,4	9,5	7,1	19,1	4,8	26,2	4,8	1458,1	
18											57,2			2,4		2,4	14,3				14,3	159,7	11,9	2,4	9,5	4,8		7,1	7,2	7,1	2,4	11,9	314,5	
19	21,4	11,9		2,4	7,2	7,1	9,5		11,9	2,4	4,8	40,5	171,6	45,3	16,7	16,7	4,8	2,4		100,1	66,7			7,1			7,1		4,8	2,4	9,5	2,4	576,5	
20	9,5	2,4			2,4							133,5	185,9	2,4	2,4	4,8	2,4		2,4		11,9									2,4	4,8		367,0	
21	26,2	69,1	4,8	33,4	31,0	33,4	21,5	7,1	31,0	11,9	47,6	26,2	78,6	11,9	45,3	45,3	38,1	11,9	21,4	31,0		19,1	11,9	31,0	16,7	2,4	23,8	31,0	59,5	23,8	14,3	28,6	888,5	
22																		14,3			4,8		11,9		2,4						2,4		35,7	
23																		2,4				26,2		26,2	11,9	7,1			2,4	16,7			92,9	
24			9,5																				2,4							7,1		4,8	23,8	
25			11,9															4,8			2,4	38,1	35,7	14,3		16,7	23,8	16,7	33,4	57,2		2,4	257,3	
26			21,5					2,4					2,4		4,8		2,4	2,4			4,8	11,9	109,6	23,8	54,8		93,0	14,3	35,7	21,4		9,5	414,6	
27			2,4						2,4								2,4	2,4						4,8	9,5	16,7		52,4	69,1	33,4		4,8	200,1	
28			4,8																		11,9				2,4	14,3			81,0	4,8			119,1	
29			57,2															2,4			16,7			2,4		2,4	11,9	14,3		26,2		2,4	135,8	
30			171,6															2,4			9,5		124,0	190,7	14,3	2,4		181,2	314,7				1010,7	
31	45,3	393,3	4,8	302,7	262,2	181,2	197,9	100,1	178,7	23,8	116,7	16,7	38,1	4,8	31,0	21,4	116,7	14,3	11,9	19,1	178,7	11,9	2,4	7,1	4,8	7,1	16,7	7,2	19,1	16,7		14,3	2366,2	
32			19,1						2,4	2,4					26,2	19,1		52,4			16,7	59,6	23,8	21,5	42,9	35,8	35,7	19,1	47,6	35,7			459,9	
Total Destinos	126,2	772,1	317,0	1353,8	882,0	476,7	1203,8	457,6	845,9	119,1	657,6	262,1	931,8	169,2	483,7	192,9	278,7	204,8	97,6	312,1	636,0	362,2	343,2	490,9	181,1	119,1	257,3	359,8	819,8	295,3	147,6	116,6	14273,3	

Figura 6.2: Matriz OD após agregação aos terminais (viagens agregadas ao mesmo terminal na origem e no destino foram desconsideradas nesta agregação).

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.3: Matriz de viagens entre terminais estimada para a madrugada do dia 27/10/2017 entre 0h e 1h.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6.2: Parâmetros de entrada nas análises de sensibilidade realizadas neste Capítulo.

		Características das Rotas (Seção 6.2)	Número de Terminais (Seção 6.3)	Itinerários (Seção 6.4)	Demanda (Seção 6.5)
Parâmetros do Banco Estruturais Terminais	Desvio máximo do tempo de viagem mínimo	20%, 30%, 40% e 50%	30%	30%	30%
	Extensão máxima da rota (km)	20, 25 e 30 km	25 km	25 km	25 km
	Número de Terminais	32	28, 29, 30, 31, 32 e 33	32	32
	Intervalo Mínimo das Linhas (minutos)	15	15	15	15
	Penalidade de tempo em terminais intermediários	5	5	5	5
	Tempo de adicional nos terminais de ponta (min)	5	5	5	5
Parâmetros do Genético Estrutural	Tamanho da População	100	100	100	100
	Número de Linhas mínimo	20 / 25 / 30 / 35 / 40	30	30	30
	Número de Linhas máximo	24 / 29 / 34 / 39 / 44	34	34	34
	Taxa de reprodução	100%	100%	100%	100%
	Taxa de mutação	10%	10%	10%	10%
	Tempo máximo de processamento (seg)	3.600	64.800	14.400	43.200
	Qtd. Máx. gerações para reinício	100	100	100	100
Parâmetros do Banco Itinerários	Desvio máximo do tempo de viagem mínimo	20%, 30%, 40% e 50%	30%	40%	30%
	Número máximo de linhas por par OD	10	10	10 / 20 / 30	10
	Número de k caminhos mínimos	30.000	30.000	30.000 / 40.000 / 50.000	30.000
	Percentual de nós repetidos mínimo para aceitar linhas novas	75%	75%	75%	75%
	Percentual limite inferior para aceitar linhas novas com demanda menor	65%	65%	65%	65%
Parâmetros do Genético Itinerários	Tamanho da População	30	30	30	30
	Taxa de Reprodução	100%	100%	100%	100%
	Taxa de Mutação	20%	20%	20%	20%
	Tempo máximo de processamento (seg)	3.600	64.800	14.400	43.200
	Qte. Máx. gerações para reinício	10	10	10	10
	Dias analisados para matriz OD	1	1	1	7

Na Tabela 6.2 a primeira coluna corresponde à variação do número e características das linhas (i) e sua cor indica, nas linhas, quais os parâmetros que serão variados e com quais possíveis valores. A segunda coluna diz respeito à variação do número de terminais (ii) que operam na rede. Na terceira, às diferentes possibilidades de itinerários entre os terminais (iii), com a variação do número máximo de linhas por par OD e do número de k caminhos possíveis buscados para montar o “Banco Itinerários”. Por fim, a quarta coluna corresponde à variação da demanda (iv), que utiliza dados de demanda advindos da análise de diferentes dias de bilhetagem.

Para comparação da qualidade das soluções encontradas, utiliza-se a rede estrutural da Noturno que operou na madrugada do mesmo dia analisado. Esta rede corresponde às linhas estruturais que operaram na madrugada e para fins de comparação será codificada nos 343 nós do tipo estrutural definidos anteriormente. Ressalta-se que esta rede não é considerada válida sob a ótica do algoritmo desenvolvido, pois nem todos os pares entre terminais podem ser atendidos com até 2 transferências. Esta rede é referenciada como “rede atual”, “rede que operou no dia analisado” ou “rede referência de comparação” ao longo desta seção.

6.3.1 *Número e características das linhas*

O primeiro cenário avaliado é uma análise de sensibilidade da qualidade da solução obtida através da metodologia proposta nesta pesquisa considerando diferentes dados de entrada para os seguintes parâmetros: número de linhas na rede, extensão máxima das linhas e desvio máximo de tempo de viagem permitido.

As descrições dos valores estão apresentadas na Tabela 6.3. Cada uma das 60 combinações de parâmetros (5x4x3, Tabela 6.3) foi executada 5 vezes de forma simultânea e independente por processadores distintos, por 3600 segundos (1 hora). O tempo de processamento de 1h foi escolhido pois adotou-se 3 dias (72h) como sendo o tempo máximo de processamento de toda a análise de sensibilidade (considerando um final de semana como bloco de tempo para execução). Em um cenário de planejamento de médio/longo prazo é possível extensão deste tempo de processamento para buscar melhores soluções.

O número mínimo de linhas escolhido foi de 20, pois estimou-se que este era um limiar inferior a partir do qual começam a existir uma maior proporção de soluções válidas para o problema, especialmente quanto à restrição de atendimento da conectividade da rede, ou seja, a partir de qualquer terminal chegar em qualquer outro utilizando até 2 transferências; em outras

palavras, com menos de 20 linhas é muito difícil encontrar soluções que atendam às restrições do problema, especialmente a de conectividade da rede. O limite superior foi de 44 linhas, tendo em vista o número de 49 linhas estruturais na rede operante no mesmo dia da demanda avaliada. Não se chegou ao limite de 49 visando a restrição 3.5.8 (número de linhas), que pressupõe um limite máximo para reduzir a complexidade da rede e facilitar a utilização do sistema pelos usuários.

Tabela 6.3: Entrada da análise de sensibilidade realizada com relação ao número e características das linhas.

Parâmetro	Valores	Total de Possibilidades
Número de Linhas	20 a 24 linhas, 25 a 29 linhas, 30 a 34 linhas, 35 a 39 linhas e 40 a 44 linhas	5
Desvio máximo de tempo de viagem	20%, 30%, 40% e 50% a mais que o tempo mínimo	4
Extensão máxima das linhas	20, 25 e 30 km	3

Embora houvesse a possibilidade de realizar os experimentos somente considerando esses dois extremos, 20 e 44 linhas, decidiu-se por também considerar diversos patamares intermediários em termos de número de linhas, considerando-se um intervalo de 5 linhas, a fim de melhor capturar o efeito desta variação nos resultados; naturalmente, um intervalo menor resultaria em um esforço de processamento muito elevado, inviável de ser realizado no âmbito desta pesquisa.

A fim de avaliar o efeito de limitar a extensão máxima para se empregar linhas mais curtas ou mais longas na rede, foram testadas as seguintes extensões máximas para as linhas estruturais: 20, 25 e 30 km. Esses valores foram escolhidos com base na distribuição das extensões das linhas na rede atual, onde a maior linha possui 24,2 km e a segunda maior possui 19,6 km. Assim, experimenta-se com uma redução ou aumento das extensões máximas e seus efeitos no projeto da rede. Foram também avaliados os cenários com extensões máximas de 10 e 15 km, porém não foram encontradas soluções válidas.

Da mesma forma, para avaliar os efeitos de diferentes desvios máximos de tempo de viagem, foram realizados os experimentos considerando desvios de até 20, 30, 40 e 50% do tempo de viagem mais rápido no tocante aos itinerários candidatos na ligação entre dois terminais. Esses valores tomam como base recomendações presentes na literatura, onde Ceder

(2015) propõe um limite superior para o tempo de viagem das linhas de 20-50% a mais que o tempo de viagem mais rápido por automóvel. Foram previamente avaliados também desvios de 0% e 10%, porém também não foram encontradas soluções válidas.

Após a agregação da matriz OD aos nós da rede viária estrutural e, na sequência, a agregação da matriz dos nós aos terminais, são então construídos os Bancos de Rotas Candidatas Estruturais entre Terminais (vide Figura. 5.4).

Foram construídos os Bancos Estruturais para cobrir os dados de entrada de desvio máximo do tempo de viagem mínimo e a extensão máxima das linhas. Na Tabela 6.4 estão apresentados o número de rotas estruturais candidatas no banco, a extensão média das linhas e o número médio de terminais atendidos por linha, para distâncias máximas variando de 10 a 30 km e desvio máximo de 0% a 50%. Foram analisados mais possibilidades que apontadas na análise de sensibilidade pois a princípio foram testadas mais configurações, porém não foram encontradas soluções válidas: não foram encontradas soluções válidas com 0% ou 10% de desvio máximo adicional, nem com limite de 10 ou 15 km para as linhas. Neste caso, a principal causa de inviabilidade foi a conectividade entre quaisquer dois terminais ser feita com até 2 transferências.

Observa-se na Tabela 6.4 que, quanto maior a extensão máxima permitida para as linhas e maior o desvio máximo, maior o número de rotas estruturais candidatas resultantes no banco, assim como são maiores a distância média das linhas e o número médio de terminais atendidos por linha. Um maior número de rotas candidatas com o aumento da extensão e desvio é benéfico pelo ponto de vista de permitir mais possibilidades de ligações durante a busca, entretanto pode prejudicar a eficiência da mesma e/ou incluir um número maior de linhas longas nas soluções.

O número médio de terminais atendidos por linha varia desde 2 (0% de desvio) até 3,47 (30km / 50% desvio), indicando que existe uma variação significativa nos tipos de linhas nos bancos estruturais gerados. Na Tabela 6.4 também destacou-se em **negrito** os 12 Bancos Estruturais que serão utilizados na análise de sensibilidade (3 extensões {20, 25, 30 km} x 4 desvios máximos {20, 30, 40 e 50%}).

Tabela 6.4: Características dos Bancos de Rotas Candidatas para as combinações de extensão máxima e desvio máximo permitido.

Extensão Máxima (km)	Desvio Máximo	Número de Rotas Estruturais Candidatas	Distância média das linhas (m)	Número médio de terminais atendidos por linha
10	1	96	6 831	2,00
10	1,1	96	6 831	2,00
10	1,2	96	6 831	2,00
10	1,3	113	7 174	2,15
10	1,4	124	7 219	2,23
10	1,5	129	7 277	2,26
15	1	191	9 742	2,00
15	1,1	191	9 742	2,00
15	1,2	243	10 533	2,21
15	1,3	323	10 972	2,41
15	1,4	389	11 260	2,55
15	1,5	429	11 371	2,61
20	1	275	12 074	2,00
20	1,1	275	12 074	2,00
20	1,2	468	13 912	2,41
20	1,3	690	14 579	2,65
20	1,4	916	15 020	2,86
20	1,5	1106	15 312	2,97
25	1	354	14 402	2,00
25	1,1	412	15 592	2,14
25	1,2	839	17 821	2,61
25	1,3	1396	18 753	2,92
25	1,4	1986	19 251	3,13
25	1,5	2539	19 550	3,24
30	1	416	16 317	2,00
30	1,1	595	19 254	2,30
30	1,2	1457	21 972	2,83
30	1,3	2746	23 142	3,19
30	1,4	4117	23 633	3,37
30	1,5	5464	23 930	3,47

6.3.1.1 Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 1): Sequência de Terminais Atendidos e Número de Linhas

Esta subseção apresenta os resultados obtidos para o Nível 1 da metodologia proposta que define o número de linhas na solução e os terminais atendidos por elas. São apresentadas análises das diferentes soluções ótimas obtidas no tocante às variáveis de interesse no projeto

da rede: principalmente as funções objetivo do Nível 1: custo generalizado total e frota estimada, assim como extensões médias das linhas, o número total de transferências na rede, o número de linhas e o desvio máximo de tempo permitido.

As próximas figuras mostram a distribuição dos valores médios de custo generalizado total (f_1), frota estimada (f_2) e número de transferências obtidos para todas as soluções válidas das 5 rodadas, agrupadas pelos diferentes parâmetros de entrada. Cada ponto nos gráficos de dispersão representa valores médios de todas as soluções válidas para uma combinação de número de linhas de entrada, desvio máximo e extensão máxima, cuja quantidade total é de acordo com a Tabela 6.5. Ou seja, esta primeira sequência de análises retrata efeitos *médios* nas soluções *válidas* a partir de mudanças nos dados de entrada no Nível 1.

A Tabela 6.5 mostra o número de soluções válidas no Nível 1 na Análise de Sensibilidade. A quantidade total de soluções válidas aumenta conforme aumentam a) o número de linhas; b) o desvio máximo e c) a extensão máxima. Algumas combinações de dados de entrada são muito restritivas, gerando apenas uma solução (20-24 linhas; desvio = 50%; 20 km de extensão total), enquanto outras geraram dezenas de milhares de soluções. Foram geradas soluções considerando a restrição de extensão máxima de 20 km apenas para desvios máximos de 30% ou mais. Os resultados apresentados na Tabela 6.5 indicam a importância da análise de sensibilidade a fim de identificar a partir de quais parâmetros de entrada são obtidas soluções válidas para a região em estudo.

A Figura 6.4 apresenta o efeito da extensão máxima das linhas como dado de entrada na média dos indicadores das soluções válidas considerando as soluções do grupo. Avalia-se, neste gráfico, as médias das variáveis custo generalizado, frota e número de transferências. Ao se aumentar a extensão máxima permitida na rede a frota também aumenta significativamente (histograma no centro da matriz). Esse fenômeno ocorre pois, com a seleção de linhas a partir de Bancos Estruturais cujas linhas possuem extensões médias maiores, os tempos de ciclo para operação das linhas na rede são em média mais longos, exigindo maior frota (equação 5.7). Além disso, a possibilidade de uso de linhas mais extensas não reduz a média do número de transferências das soluções (histograma inferior direito), apesar das linhas atenderem um número maior de terminais em média (Tabela 6.4).

Tabela 6.5: Número de Soluções válidas no Nível 1 na Análise de Sensibilidade.

Dados de Entrada			Quantidade de Soluções
Linhas	Desvio Máximo	Extensão Máxima	
20-24	1,2	30	40
		25	144
	1,3	30	11248
		25	649
	1,4	30	14585
		20	1
25-29	1,2	25	1
		30	635
	1,3	20	1
		25	1315
		30	25422
	1,4	20	6
		25	3122
		30	28584
	1,5	20	32
		25	4510
		30	25675
30-34	1,2	25	12
		30	5386
	1,3	20	3
		25	4934
		30	37216
	1,4	20	91
		25	8160
		30	34497
	1,5	20	298
		25	13140
		30	30839
35-39	1,2	25	56
		30	14366
	1,3	20	44
		25	10731
		30	38192
	1,4	20	446
		25	13851
		30	33380
	1,5	20	1437
		25	20619
		30	30606
40-44	1,2	25	1732
		30	26937
	1,3	20	65
		25	21754
		30	35773
	1,4	20	2141
		25	22087
		30	30925
	1,5	20	1330
		25	22915
		30	32718

Figura 6.4: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando extensão máxima das linhas da rede como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6.5, são apresentados os efeitos da variação do dado de entrada extensão máxima das linhas com relação à distância média das linhas, número de linhas na solução e tempo de viagem dentro do veículo. Ao permitir maiores extensões máxima das linhas, as soluções válidas resultaram, na média, linhas mais longas (dispersão superior central). Isso se deve ao fato de os Bancos Estruturais terem mais linhas longas com maior probabilidade de gerarem redes válidas por conectarem mais terminais. Além disso, observa-se que, na média, *soluções com mais linhas não necessariamente correspondem a uma redução significativa das extensões médias* (dispersão superior central). No algoritmo proposto, o número de linhas e a extensão média são elementos independentes e definidos separadamente.

Figura 6.5: Matriz de dispersão para extensão média das linhas, número de linhas e tempo de viagem dentro do veículo, considerando extensão máxima das linhas da rede como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6.6 observa-se o efeito na média dos indicadores selecionados considerando o intervalo de linhas como dado de entrada do modelo. Com o aumento do número de linhas na rede, o número de transferências totais tende a cair (gráfico inferior direito). Observa-se na distribuição que retrata f_1 e f_2 , frota total x custo generalizado (dispersão superior central) médias próximas entre si para número de linhas de entrada distintos. Ou seja, conclui-se que é possível obter soluções competitivas para diferentes números de linhas na rede. A título de comparação, a rede que operou neste dia resultou em um custo generalizado total da rede de 741.866 minutos com frota de 320 veículos (e 8.947 transferências) neste nível de agregação

da oferta, sendo uma solução dominada pelas encontradas nesta análise de sensibilidade quanto a estas duas funções objetivo.

Figura 6.6: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando número de linhas de entrada para agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6.7 é possível observar o efeito da variação do desvio máximo como dado de entrada na média de indicadores selecionados em soluções válidas encontradas no Nível 1. Quanto menor o desvio máximo permitido, mais transferências são necessárias (gráfico inferior direito), levando a um custo generalizado elevado (histograma superior esquerdo). Isso se deve ao fato de que um maior desvio médio gera maiores possibilidades de conexões entre linhas e terminais, assim como linhas que atendem a mais terminais, aumentando a possibilidade de

serem incluídas mais ligações diretas entre os pares OD ao longo da busca e, portanto, reduzir o número de transferências e do custo generalizado das soluções válidas encontradas.

Figura 6.7: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, utilizando desvio máximo como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Um aumento do desvio máximo permitido para 30% ou mais permitiu encontrar soluções válidas com menores custos generalizados médios (histograma superior esquerdo) e uma menor frota média (histograma central). Este resultado aponta *a importância de avaliar desvios máximos de tempo inclusive de até 50%* pois reduz os custos generalizados e a frota necessária à operação das redes, mesmo que a princípio possa ser contraintuitivo pelo fato de as linhas serem mais longas e com maiores desvios do caminho mais rápido possível.

De modo a comparar com as médias das soluções de diferentes dados de entrada, as próximas figuras apresentam a distribuição de uma amostra de todas as soluções válidas para indicadores selecionados. A Figura 6.8 apresenta a distribuição de uma amostra de 20 mil soluções válidas novamente com relação ao desvio máximo, permitindo observar com mais clareza o *efeito benéfico de aumento do desvio máximo na redução do custo generalizado da rede* (histograma superior esquerdo), sem necessariamente gerar um aumento de frota expressivo (histograma central). Igualmente, as nuvens de soluções para diferentes desvios máximos possuem significativa redução no número de transferências com aumento do desvio (histograma inferior direito) com o mesmo patamar de intervalo de valores para frota total (a partir de 250 veículos).

Figura 6.8: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando desvio máximo como agregação.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.9 apresenta a matriz de dispersão quanto às mesmas variáveis custo generalizado, frota e número de transferências por número de linhas de entrada nas soluções. Observa-se uma redução expressiva no número de transferências com o aumento do número de linhas (histograma inferior direito), redução esta que reflete em menores custos generalizados (histograma superior esquerdo), sem necessariamente exigir aumento de frota (gráfico superior central).

O aumento do número de linhas na rede aumenta a possibilidade de ligações diretas que leva ao encontro de soluções com menor custo generalizado e, portanto, a se encontrar soluções de equilíbrio. Observa-se, no entanto, a presença de soluções de diferentes conjuntos de dados de entrada na fronteira de Pareto para custo generalizado e frota ($f_1 \times f_2$, dispersão superior central, sendo a Fronteira de Pareto as soluções mais à esquerda e abaixo na nuvem de pontos). Este resultado indica novamente que *existem soluções de equilíbrio para diferentes números de linha na rede*.

A Rede Atual contava com um custo generalizado total de 741.866 minutos e 8.947 transferências estimado neste nível de agregação, sendo muito mais elevado que a grande parte das soluções representadas na Figura 6.9 (dispersão superior direita). Apesar de uma parcela das soluções geradas apresentar frota maior que da rede que operou (320 veículos), um conjunto de soluções exige uma frota menor, chegando na faixa de 260 veículos (dispersão central esquerda). Desta forma, os resultados no primeiro nível de agregação indicam que o método gera soluções competitivas para operação.

Quanto à eficiência da busca em encontrar melhores soluções, a Tabela 6.6 apresenta uma agregação dos valores de custo generalizado para as 5 execuções de cada combinação de parâmetros de entrada. Optou-se pela análise da convergência do custo generalizado pela dificuldade do mesmo cálculo para dois objetivos. As maiores diferenças foram de até 16% em combinações de parâmetros de entrada que geraram poucas soluções válidas, ou seja, em uma região de busca com muitas regiões de soluções inviáveis. Na maioria das execuções a diferença entre os menores e maiores valores mínimos fica abaixo de 5%, indicando que *a busca consegue direcionar as soluções para patamares similares da função objetivo custo generalizado*.

A Figura 6.10 apresenta um exemplo da evolução do custo generalizado ao longo da busca para as 5 execuções realizada para a combinação 35-39 linhas, 50% de desvio máximo e 25 km de extensão máxima das linhas, indicando uma convergência para um patamar semelhante após 7.500 gerações em todas as execuções.

Figura 6.9: Matriz de dispersão para custo generalizado, frota e número de transferências, considerando número de linhas de entrada como agregação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6.6: Comparação dos menores valores de custo generalizado entre as 5 rodadas para cada conjunto de dados de entrada da análise de sensibilidade.

Distância Máxima	Número de Linhas	Desvio Máximo	Custo Generalizado Total (mínimo da rodada)			Diferença entre Maior e Menor
			Mínimo	Média dos mínimos	Maior mínimo	
20	20-24	1,5	594648	594648	594648	0%
		1,3	645166	645166	645166	0%
	25-29	1,4	605966	608331	613038	1%
		1,5	580992	592326	610013	5%
		1,3	612435	666440	731027	16%
	30-34	1,4	561275	585514	614933	9%
		1,5	560316	582406	611661	8%
		1,3	593790	604649	617128	4%
	35-39	1,4	550679	563702	576657	5%
		1,5	548521	554687	561693	2%
		1,3	583348	620090	652272	11%
	40-44	1,4	545040	549250	553446	2%
		1,5	540633	544799	550194	2%
25	20-24	1,3	606028	642842	720605	16%
		1,4	589147	598419	606530	3%
		1,5	575955	583568	595217	3%
	25-29	1,2	801036	801036	801036	0%
		1,3	599905	610534	619518	3%
		1,4	560492	572147	580887	4%
		1,5	560186	566556	569543	2%
	30-34	1,2	659823	691179	736650	10%
		1,3	582439	588711	592417	2%
		1,4	543851	549186	559240	3%
		1,5	546355	552353	558583	2%
	35-39	1,2	637540	662472	742809	14%
		1,3	564904	570933	577102	2%
		1,4	545010	550490	552930	1%
		1,5	538515	540934	543244	1%
	40-44	1,2	608642	615730	625115	3%
		1,3	560736	565311	571008	2%
		1,4	532515	538531	542552	2%
		1,5	534076	538212	540756	1%
30	20-24	1,2	675946	698657	711005	5%
		1,3	614632	620257	628723	2%
		1,4	576081	587813	603444	5%
		1,5	573891	582374	590693	3%
	25-29	1,2	653795	665457	670857	3%
		1,3	594589	600433	605591	2%
		1,4	561899	568091	580940	3%
		1,5	563629	569243	575192	2%
	30-34	1,2	634065	638549	643381	1%
		1,3	576336	581692	586971	2%
		1,4	550019	555573	562065	2%
		1,5	553948	555271	557118	1%
	35-39	1,2	618083	623760	628026	2%
		1,3	563645	571061	575249	2%
		1,4	536998	546039	553374	3%
		1,5	542363	545980	552987	2%
	40-44	1,2	594666	606892	615645	3%
		1,3	555197	561556	568650	2%
		1,4	537220	540960	544943	1%
		1,5	536673	539783	545416	2%

Figura 6.10: Exemplo da evolução do menor custo generalizado encontrado até então ao longo das gerações no Nível 1.

Fonte: Próprio autor.

De modo a melhor compreender o efeito do número de linhas na composição das melhores soluções no Nível 1, a Figura 6.11 apresenta uma dispersão de todas as soluções válidas com foco nos melhores valores das funções objetivo f_1 e f_2 do Nível 1. Observa-se uma distribuição quase vertical das soluções até o custo generalizado em torno de 550 mil minutos, quando então soluções que possuem custo generalizado menor só são encontradas com o emprego de uma frota maior.

É ressaltado que existe um número de linhas que de fato não gera soluções nesta região da fronteira, principalmente abaixo de 24 linhas na rede. Em contrapartida, destaca-se a diversidade do número de linhas das soluções na fronteira, variando desde em torno de 28 linhas até 45 linhas. Este resultado indica que existe um espaço de soluções válidas e de boa qualidade deste estudo de caso com uma ampla variação do número de linhas adotado.

6.3.1.1.1 Características das Melhores Soluções de Equilíbrio no Nível 1

Pelo fato de serem geradas milhares de soluções para o problema, *a análise de sensibilidade permite encontrar características comuns das soluções de equilíbrio competitivas* quanto ao custo generalizado e frota total. Assim, de modo a descobrir características comuns das linhas das melhores soluções no Nível 1, na Figura 6.11 foi definida uma reta tracejada para separar as “melhores” soluções das demais. A separação foi definida tal que incluísse boa parte da fronteira de Pareto porém removendo um grande percentual das soluções dominadas. As melhores soluções são aquelas abaixo da reta, sendo 7.283 soluções de um total de 618.068, ou seja, em torno de 1,18% das soluções.

A Figura 6.12 mostra, para este subconjunto, o efeito do aumento do número de linhas em indicadores selecionados das soluções. Destaca-se a redução das extensões médias com o aumento do número de linhas. Embora tivesse sido destacado anteriormente que o número de linhas e a extensão média sejam dados de entrada independentes e definidos separadamente, *a extensão média das linhas diminui significativamente com o aumento do número de linhas ao se considerar o conjunto das melhores soluções de equilíbrio.*

A explicação possível é que as vantagens advindas com mais linhas (maior número de ligações diretas, mais conexões entre linhas) superem as desvantagens (aumento do tempo de ciclo e da frota) caso as extensões médias das linhas sejam reduzidas. Dessa forma, conclui-se que *a busca por soluções de diferentes números de linhas deve idealmente restringir as extensões das rotas de forma a direcioná-la ao espaço onde são encontradas as melhores soluções de equilíbrio.*

Uma segunda discussão a partir da Figura 6.12 é quanto ao tempo de espera. Junto com a redução do número de transferências totais da rede e do tempo de viagem dentro dos veículos, o tempo de espera da rede aumenta com o aumento do número de linhas. Esse aumento contínuo impactou no custo generalizado da rede, que aumentou a partir de 45 linhas. O tempo de espera aumenta devido à maior distribuição dos passageiros entre em redes com mais linhas, reduzindo o carregamento crítico e, portanto, a frequência necessária. As frequências reduzidas significam maiores intervalos entre os veículos, que leva ao aumento do tempo de espera.

6.3.1.1.2 Linhas e ligações mais comuns entre Terminais

Na análise de sensibilidade realizada, foram encontradas 618.068 soluções válidas para a rede da madrugada de São Paulo, das quais 7.283 soluções foram selecionadas como as

melhores soluções de equilíbrio no Nível 1 de projeto de rede para análise de características comuns. A partir destas, foram extraídas as linhas mais utilizadas nas soluções válidas. Esta análise permite *saber quais rotas ocorreram com maior frequência, evidenciando as mais prioritárias e importantes que levaram aos melhores resultados de custos generalizados e frota*. Nesta subseção, são apresentadas análises para o conjunto das melhores soluções de equilíbrio com relação à (i) linhas entre terminais mais comuns; (ii) principais sequências de terminais atendidos entre terminais das linhas e (iii) ligações entre terminais mais comuns.

Na Figura 6.13 é apresentada uma matriz de densidade de linhas deste conjunto das melhores soluções. As linhas representam o terminal de origem e as colunas do terminal de destino. Nesse recorte de análise, a linha $A \rightarrow B$ indica terminal inicial em A e terminal final em B, podendo atender outros terminais (ex. inclui $A \rightarrow C \rightarrow B$, $A \rightarrow D \rightarrow B$, $A \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow B$, etc.). Observam-se que poucas linhas são adotadas em praticamente todas as soluções, como por exemplo Capelinha – Jd. Ângela (98,9% das melhores soluções) e Grajaú – Vila Mariana (86,4%). Mesmo as linhas mais comuns não estão presentes nas 100% das melhores soluções de equilíbrio pois o número de possibilidades de linhas semelhantes que atendem aos mesmos pares OD é alto.

Esta matriz da Figura 6.13 contribui na tomada de decisão pois permite verificar se uma linha em questão faz parte das melhores soluções para o problema. Por exemplo, a linha Santo Amaro – Vila Nova Cachoeirinha aparece em apenas em 0,014% das melhores soluções. É uma ferramenta de análise de projeto de rede que auxilia os planejadores caso se queira avaliar uma linha isoladamente para fazer parte da rede ao verificar as características das melhores soluções.

A Tabela 6.7 apresenta as linhas mais comuns nas soluções com a sequência de terminais que são atendidos. Nesse recorte de análise, cada possibilidade de ligação é contabilizada separadamente (ou seja, $A \rightarrow B$ é diferente de $A \rightarrow C \rightarrow B$). Esta tabela evidencia as possibilidades de atendimento para um mesmo terminal de origem e de destino. A Linha Capelinha – Jd. Ângela, por exemplo, adotada em 98,9% das melhores soluções, aparece como a linha mais utilizada com o trajeto $4 \rightarrow 6 \rightarrow 8 \rightarrow 7$, em 65% das soluções. As demais soluções apresentam terminais intermediários diferentes para esta linha ou ligam diretamente os dois terminais em questão.

Figura 6.11: Dispersão dos custos generalizados x frota total no Nível 1 por número de linhas na solução.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.12: Média de indicadores selecionados para as melhores soluções no Nível1 em função do número de linhas na solução.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.13: Terminal de origem e destino das linhas mais comuns nas melhores soluções.

Fonte: Próprio autor.

Das 30 linhas mais comuns nas soluções de equilíbrio presentes na Tabela 6.7, 4 delas atendem 2 terminais, 14 atendem 3 e 12 atendem 4 terminais. Esse resultado evidencia a *importância de se considerar o atendimento de 2, 3 e até 4 terminais em uma linha estrutural*. Além disso também auxilia na tomada de decisão pois fornece uma fonte de propostas de linhas estruturais à região analisada classificadas com base na sua presença nas melhores soluções.

Em seguida, a Figura 6.14 mostra quais são as ligações diretas mais encontradas nas soluções. Uma ligação direta é quando é possível sair de um terminal e chegar a outro terminal com a utilização de uma única linha, sem transferências e independente do número de paradas intermediárias. Na Figura 6.14 o número máximo chega a aproximadamente 21 mil pois uma

mesma solução pode ter ligações diretas entre dois terminais por meio de duas ou mais linhas que os atendem (nesse recorte, uma linha $A \rightarrow B$ e $A \rightarrow C \rightarrow B$ contaria 2 vezes para o par $A \rightarrow B$).

Tabela 6.7: As 30 linhas mais comuns nas melhores soluções de equilíbrio selecionadas.

Ordem	Linha (Terminais)	Quantidade de vezes nas melhores	Percentual nas Melhores
1	[4, 6, 8, 7]	4726	65%
2	[12, 20, 19, 21]	3351	46%
3	[9, 11, 17]	3337	46%
4	[2, 31, 17]	3186	44%
5	[23, 25, 26, 27]	3100	43%
6	[3, 29]	2769	38%
7	[9, 17]	2726	37%
8	[17, 6, 4, 5]	2680	37%
9	[7, 8, 10, 17]	2657	36%
10	[25, 30, 29]	2461	34%
11	[9, 11]	2457	34%
12	[14, 16]	2408	33%
13	[22, 23, 30, 28]	2356	32%
14	[7, 8, 9]	2305	32%
15	[26, 27, 28, 29]	2298	32%
16	[24, 3, 29]	2272	31%
17	[9, 8, 31]	2186	30%
18	[24, 3, 30]	2175	30%
19	[13, 14, 19]	2108	29%
20	[1, 19, 14, 13]	1935	27%
21	[4, 6, 10, 11]	1875	26%
22	[7, 8, 31]	1834	25%
23	[1, 31, 6, 4]	1740	24%
24	[5, 2, 31, 1]	1667	23%
25	[13, 20, 31]	1645	23%
26	[11, 18, 32]	1643	23%
27	[3, 30, 26, 32]	1613	22%
28	[12, 13, 16]	1529	21%
29	[14, 16, 15]	1486	20%
30	[12, 13, 14]	1467	20%

As principais ligações que aparecem nesta análise são Pinheiros – Butantã, Jd. Ângela – Guarapiranga e Capelinha – João Dias, devido ao fato de serem terminais muito próximos entre si, possuírem este trecho em comum com muitas linhas ou apresentarem uma demanda que

justifique este atendimento. Considerando um número de conexões na ordem de 21 mil e um número de melhores soluções avaliadas de 7 mil, essas principais ligações são feitas em média por 3 linhas/solução. Ligações diretas com grandes volumes neste recorte portanto *indicam trechos que possivelmente são melhor atendidos com duas ou mais linhas estruturais conectando-os*.

Figura 6.14: Ligações diretas mais utilizadas nas melhores soluções.

Fonte: Próprio autor.

Por fim, a Figura 6.15 mostra o percentual que uma ligação direta aparece nas melhores soluções. Enquanto as figuras anteriores mostraram que não existe um padrão de repetição de ocorrência expressivo das linhas a serem adotadas, neste recorte de análise é possível observar que muitas ligações diretas existem em 100% das melhores soluções. Esta matriz é de grande auxílio no projeto da rede, pois permite *avaliar a importância de ligações diretas específicas entre terminais com base nas características das linhas das melhores soluções de equilíbrio*.

Figura 6.15: Matriz do percentual de ligações diretas entre os terminais das melhores soluções.

Fonte: Próprio autor.

Por exemplo, a ligação Vila Mariana – São Miguel aparece em menos de 0,03% das melhores soluções de equilíbrio avaliadas, indicando que praticamente nenhuma das linhas que atendem estes 2 terminais fazem parte das melhores soluções no Nível 1. A matriz é simétrica devido ao fato de que as linhas atendem a mesma sequência de terminais na ida e na volta.

6.3.1.1.3 Quantidade de linhas por terminal

Um dos indicadores no projeto de redes estruturais de transporte público é a quantidade de linhas que atendem cada terminal. Com a análise de sensibilidade é possível avaliar este indicador com base nas melhores soluções. A Tabela 6.8 mostra a quantidade média de linhas por terminal para as melhores soluções de equilíbrio no Nível 1. Na tabela diferenciam-se linhas que atendem aquele terminal apenas de passagem das linhas que fazem ponto final no terminal. Observa-se uma grande variação na quantidade de linhas por terminal, entre 1,94 e 7,45 linhas atendendo por passagem e entre 0,55 até 5,10 linhas com ponto final no terminal. Os terminais que em média concentraram a maior quantidade de linhas foram aqueles localizados nas áreas centrais: Vila Mariana (7,45 linhas de passagem), Pinheiros (7,22 linhas de passagem) e Pq. D. Pedro II (6,78 linhas de passagem). Este resultado indica que a utilização dos terminais centrais como base concentradora das linhas parece direcionar a redes mais eficientes neste estudo de caso.

Na Tabela 6.8 também estão apresentados os valores para a rede que operou no mesmo dia da análise. Na rede atual, observa-se uma concentração grande de linhas em poucos terminais, principalmente no Terminal Pq. D. Pedro II. As melhores soluções selecionadas do Nível 1 também apresentam mais linhas de passagem quando comparadas com a rede atual. Isso ocorre tanto em virtude de um maior número de terminais atendidos em média por linha e pela maior extensão média das linhas.

6.3.1.1 Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 2): Trajeto Entre Terminais e Estimativa de Transferências

As soluções existentes na fronteira de Pareto de f_1 (custo generalizado) e f_2 (frota) do Nível 1 após o processamento do Genético Estrutural são levadas ao Nível 2 para definição dos itinerários entre os terminais. Na análise de sensibilidade, ao todo foram geradas 618.068 soluções no Nível 1 nas 300 rodadas (5x60 combinações de dados de entrada). Em cada delas as soluções na fronteira de Pareto foram dado de entrada para o Genético Itinerários do Nível 2. Ao todo foram geradas 13.651.202 soluções ao longo da busca no Nível 2. Esta subseção

apresenta a análise e discussões dos resultados obtidos neste nível que define o itinerário das linhas.

Tabela 6.8: Média de quantidade de Linhas por Terminal para as melhores soluções no Nível 1 e comparativo com rede atual.

Terminal		Linhas (projeto)		Linhas (Rede Atual)	
Número	Nome	Passagem	Final	Passagem	Final
1	Vila Madalena	4,43	3,04		2
2	Butantã	4,27	2,02	1	1
3	Guaianazes	2,52	1,25	1	1
4	Capelinha	4,52	4,00		1
5	Campo Limpo	3,31	2,64		1
6	João Dias	4,66	0,66	1	
7	Jd. Ângela	3,77	3,77		1
8	Guarapiranga	3,98	0,55	1	
9	Grajaú	3,51	3,51		2
10	Santo Amaro	4,00	1,09		6
11	Jabaquara	4,22	3,63		2
12	Pirituba	1,94	1,94		2
13	VL. Nova Cachoeirinha	4,02	3,33		3
14	Casa Verde	2,42	1,33	1	1
15	Tucuruvi	2,14	2,05		3
16	Santana	4,01	1,47	1	4
17	Vila Mariana	7,45	5,10	2	
18	Sacomã	3,32	2,16		6
19	Barra Funda	3,83	1,43	1	1
20	Lapa	2,97	1,06		5
21	Pq. D. Pedro II	6,78	3,35		23
22	Sapopemba	3,46	2,60	2	
23	São Mateus	3,57	2,46		4
24	Cid. Tiradentes	2,36	2,09		2
25	Carrão	3,48	1,31	1	4
26	Aricanduva	4,95	2,14	3	2
27	Penha	4,30	2,78	2	1
28	A.E. Carvalho	2,74	1,58		3
29	São Miguel	3,55	3,55		3
30	Itaquera	4,56	1,33		5
31	Pinheiros	7,22	3,88		8
32	Belém	4,62	2,36	2	2

A Figura 6.16 apresenta a matriz de dispersão dos resultados médios de quantidade de nós não-atendidos, percentual de duas ou mais transferências e número de transferências das soluções no Nível 2 considerando agrupamento por número de linhas de entrada, desvio máximo e extensão máxima das linhas. Cada ponto representa a média das soluções válidas no

Nível 2 geradas com base no agrupamento original da análise de sensibilidade apresentado na Tabela 6.5.

Ao contrário do Nível 1, onde a possibilidade de se chegar de qualquer terminal para qualquer outro usando até 2 transferências era obrigatória para que uma solução fosse considerada válida, no Nível 2 isto não é necessário, portanto uma certa quantidade de nós da rede estrutural não é atendida por nenhuma linha. Observa-se na Figura 6.16 que o *aumento do número de linhas como dado de entrada tende a gerar um número menor de transferências* (histograma inferior direito) *e uma menor quantidade de nós não-atendidos pela rede estrutural* (histograma superior esquerdo). A inclusão de mais linhas aumenta a probabilidade de serem adicionados trajetos que percorrem uma sequência de nós ainda não atendidos.

A Figura 6.17 por sua vez apresenta a matriz de dispersão dos resultados médios de quantidade de nós não-atendidos, distância média das linhas e número de transferências das soluções no Nível 2 para o mesmo agrupamento. *Desvios maiores tendem a reduzir o número de transferências na rede* (gráfico inferior direito) *e do número de nós não-atendidos* (gráfico superior esquerdo), *com uma maior extensão média das linhas*. Não há uma diferença significativa nos valores médios das soluções para desvios de 1,4 e 1,5.

Assim como no Nível 1, na análise das soluções do Nível 2 foram filtradas as soluções de melhor qualidade para avaliar as suas características. Aplicou-se um filtro nas soluções no Nível 2 de tal forma: número de transferências menor que 33.000 (rede atual: 31.027), frota na solução de origem no nível 1 menor ou igual a 350 (rede atual: 320), número de rotas entre 27 e 44 e número de nós não-atendidos menor ou igual a 76 (rede atual: 68). Os valores foram selecionados de modo a selecionar aproximadamente as 10% melhores soluções. Das 13.651.202 soluções foram selecionadas 1.400.254 soluções.

A Figura 6.18 apresenta a matriz de dispersão das funções objetivo f_3 e f_4 adotadas neste nível (número de transferências e percentual de 2 ou mais transferências) e a frota (estimada na solução de origem no Nível 1) com relação do número de linhas na solução. Foi selecionada uma amostra aleatória de 100 mil soluções para visualização.

Figura 6.16: Matriz de dispersão para número de transferências, percentual 2 ou mais transferências e quantidade de nós não atendidos média das soluções válidas no nível 2, considerando número de linhas de entrada como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Observam-se distintos números de linhas das soluções na fronteira de Pareto entre número de transferências x frota (dispersão superior central), indicando novamente que *existem soluções de qualidade para diferentes números de linhas na rede*. Além disso, nota-se visualmente a correlação entre número de transferências e o percentual de 2 ou mais transferências (distribuição superior direita), uma vez que o indicador número de transferências recebe uma penalidade para demanda não atendida.

As soluções também apresentam grande variação quanto à demanda não-atendida (representado por f_3 , o percentual de 2 ou mais transferências no Nível 2), variando desde menos

de 25% a mais de 40% (distribuição inferior esquerda). Analisando criticamente o resultado, essa variação acaba sendo transferida para o número total de transferências, dificultando avaliar se as soluções estão de fato com uma menor quantidade de transferências ou se é apenas a demanda não-atendida que está variando.

Figura 6.17: Matriz de dispersão para número de transferências, distância média das linhas e quantidade de nós não atendidos médio das soluções válidas no nível 2, considerando desvio máximo de linhas de entrada como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.18: Matriz de dispersão para número de transferências, percentual 2 ou mais transferências e frota (obtida no nível 1) considerando número de linhas na solução como agrupamento, para as melhores soluções do nível 2.

Fonte: Próprio autor.

A Figura 6.19 por sua vez apresenta a matriz de dispersão entre a quantidade de nós não-atendidos, frota (Nível 1) e número de transferências para uma amostra de 100 mil das melhores soluções selecionadas. Ressalta-se que a partir de um determinado número de nós *é baixa a redução no número de transferências com o aumento do número de nós atendidos*: o menor valor de número de transferências para soluções que não atendem 45 nós é próxima daquelas que não atendem 60 nós (dispersão superior direita). A explicação é que os nós atendidos adicionalmente não possuem uma alta demanda que influencie significativamente na penalidade do número de transferências.

Figura 6.19: Matriz de dispersão para número de transferências, frota (obtida no nível 1) e quantidade de nós não atendidos, considerando número de linhas de entrada como agrupamento, para as melhores soluções do nível 2.

Fonte: Próprio autor.

No Nível 2 são definidos os itinerários das linhas entre os terminais conectados por elas. De modo a ilustrar as escolhas de itinerários distintos no Nível 2, a Figura 6.20 apresenta todos os itinerários das linhas que passam entre os nós dos Terminais Vila Madalena e Pinheiros e suas características. Observa-se que *a ordem de menores tempos de viagem não é a ordem de frequência de uso daquele itinerário*. O número de usos é o número de vezes que aquela sequência de nós aparece nas linhas adotadas nas soluções. O itinerário vermelho, embora tenha a maior demanda potencial dentre as linhas apresentadas, foi pouco utilizado nas soluções. Isoladamente, a análise do número de usos de cada itinerário nas soluções pode auxiliar a

tomada de decisão indicando se determinado itinerário contribui com soluções que otimizam a demanda não-atendida e o número estimado de transferências (f_3 e f_4).

Sobre a evolução das soluções ao longo da busca no Nível 2, a Figura 6.21 apresenta um exemplo para uma execução do algoritmo que obteve 10 soluções de Pareto no Nível 1. É possível observar que o número de gerações avaliadas varia entre as soluções, uma vez que o tempo dispendido na busca é proporcional à distância da solução ao ponto ideal quanto às duas funções f_1 e f_2 no Nível 1 (vide Figura 5.20). Além disso, em geral o emprego de mais tempo na busca leva a melhores soluções.

Figura 6.20: Distribuição de usos nas soluções dos itinerários entre os nós dos terminais Vila Madalena e Pinheiros, considerando até 1,5 (50%) de desvio no tempo de viagem.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 6.22 são apresentadas as mesmas curvas de evolução para 5 rodadas do algoritmo para um mesmo conjunto de dados de entrada. Em geral, as rodadas chegaram em valores mínimos de número de transferências próximos entre si (entre 22 e 23 mil), indicando que a busca consegue encontrar soluções melhores quanto a este objetivo de forma consistente.

Na próxima subseção são apresentados os resultados após o recálculo da frequência de operação, da frota necessária para operar a rede e do custo generalizado (Nível 3).

Figura 6.21: Exemplo da evolução das soluções no Nível 2 quanto ao número total de transferências para 10 soluções de Pareto encontradas no Nível 1 (35-39 linhas, 1,4 (40%) de desvio máximo, extensão máxima de 25 km, rodada número 4 de 5).

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.22: Exemplo de evolução no Nível 2 para 5 execuções do algoritmo com os parâmetros: 35-39 linhas, 1,4 desvio máximo e extensão máxima de 25 km.

Fonte: Próprio autor.

6.3.1.2 Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 3): Custo Generalizado e Cálculo da frota

Todas as soluções na fronteira de Pareto de cada rodada do Nível 2 quanto ao percentual com 2 ou mais transferências e número de transferências (f_3 e f_4) são passadas ao Nível 3, onde é alocada a demanda às redes e são recalculadas as frotas necessárias para operação das linhas através do software EMME 4.3. Ao final do Nível 3, são calculados diversos indicadores das soluções. Na listagem a seguir, são apresentados os indicadores calculados. Em parênteses, são indicados os valores obtidos para a rede que operou no dia analisado:

- Demanda alocada (13323 viagens);
- Número de linhas na rede (49);
- Número médio de linhas por passageiro (1,72);
- Número médio de transferências (0,72);
- Tempo médio de viagem dentro do veículo (17,38 min);
- Tempo médio de espera (3,68 min);
- Frota (314 veículos);
- Custo generalizado médio por passageiro alocado (29,83 min);
- Número de nós atendidos (275);
- Número total de transferências (9.640);
- Percentual da demanda não atendida pela rede estrutural (33,00%);
- Distância média das linhas (12,163 km).

Esta subseção apresenta os resultados obtidos para as 8.013 soluções da Análise de Sensibilidade registradas como fronteira de Pareto no Nível 2 em suas respectivas rodadas do algoritmo. No Nível 2 foram encontradas e avaliadas ao todo 13.651.202 soluções. Nesta subseção são apresentadas análises que buscam compreender a qualidade das soluções em função de indicadores selecionados e são escolhidas algumas soluções para avaliação final com a rede de linhas locais no Nível 4.

Na Figura 6.23 é apresentado o box-plot da frota necessária para atender a demanda por número de linhas na rede. Observa-se que há uma tendência de crescimento da frota conforme o número de linhas na solução aumenta. Existe, no entanto, uma grande variação do valor entre as soluções, pois existem soluções de 25 linhas que exigem mais frota que outras de 44 linhas e soluções de 44 linhas com menos frota que outras de 25 linhas. Considerando que a frota estimada usando a mesma metodologia para a rede que operou no dia foi de 314 veículos, boa

parte das soluções apresenta frota menor, principalmente aquelas com menos de 30 linhas. Com mais linhas na rede, embora existam muitas redes com frota maior que 314, ainda se encontram muitas soluções com frota menor que este valor de referência de 314 veículos. Este resultado indica que *o algoritmo proposto consegue gerar soluções válidas para a rede estrutural que utilizam menos frota quando comparados ao valor de referência do estudo de caso.*

Figura 6.23: Box-plot da frota necessária para atender a demanda para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.

Fonte: Próprio autor.

Já a Figura 6.24 mostra o gráfico de box-plot da variação do percentual de demanda não-atendida pela rede estrutural com relação ao número de linhas. No Nível 3, a demanda não-atendida é onde o algoritmo de alocação do software EMME não encontra nenhum caminho disponível, ou seja, aquela viagem que inicia ou termina em um nó onde não passam linhas estruturais. Observando conjuntamente com o gráfico da Figura 6.23, *apesar das redes com menos linhas apresentarem frota menor, o percentual de atendimento da demanda tende a ser pior.* Isso ocorre pois um número menor de linhas no geral atende a um número de menor de

nós e oferece menos conexões na rede. No entanto, o benefício do aumento do número de linhas no percentual da demanda não-atendida não é linear. A partir de 36 linhas, o aumento da quantidade de linhas não beneficia o percentual de demanda atendida.

Figura 6.24: Box-plot do percentual de demanda não-atendida pela rede estrutural para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.

Fonte: Próprio autor.

O efeito no custo generalizado médio por usuário com relação ao aumento do número de linhas na solução está representado na Figura 6.25. Observa-se uma grande variação desse indicador para soluções com o mesmo número de linhas, porém aproximadamente o mesmo intervalo de valores para números de linhas diferentes. Em virtude do PRTP ser um problema multiobjetivo, é necessário a análise de mais indicadores conjuntamente.

Figura 6.25: Box-plot do custo generalizado médio por viagem para todas as soluções no Nível 3 por número de linhas na rede.

Fonte: Próprio autor.

Dessa forma, a Figura 6.26 apresenta a matriz de dispersão para custo generalizado médio dos usuários, frota e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural considerando número de linhas de entrada como agrupamento. Observa-se novamente que *os valores de custo generalizado médio são muito próximos quando analisados diferentes números de linhas como dado de entrada* (histograma central), *porém existe a tendência de que com mais linhas na solução a frota necessária tende a ser maior* (histograma superior esquerdo), *com o benefício de um atendimento maior a demanda* (histograma inferior direito).

Além disso, na Figura 6.26 também é possível observar a fronteira de Pareto entre os indicadores custo generalizado médio e frota total (representando os objetivos iniciais f_1 e f_2). Ressalta-se que no Nível 3 é utilizado o indicador custo generalizado médio por usuário pois não seria adequado o uso do custo generalizado total já que uma parcela da demanda não é atendida. Nessa fronteira (dispersão central esquerda), à exceção de uma solução extrema com

23 minutos e frota de aproximadamente 250 veículos (do grupo de 20-24 linhas), todos os intervalos de linhas na solução contribuem com soluções de equilíbrio de qualidade. Adicionando o percentual da demanda não atendida na análise através do gráfico de dispersão inferior central da mesma Figura 6.26, visualizamos que a solução extrema mencionada com custo generalizado baixo (~23min) possui um valor de demanda não atendida muito elevado (~42%), e que boa parte das soluções de equilíbrio nesta fronteira (custo generalizado médio x percentual da demanda não-atendida) possuem mais linhas na solução. A Figura 6.26 *evidencia o trade-off existente no PRTP entre número de linhas na solução, custo generalizado médio, frota necessária para operação e percentual da demanda não atendida.*

Figura 6.26: Matriz de dispersão para custo generalizado médio dos usuários, frota e percentual da demanda não atendida pela rede estrutural considerando número de linhas de entrada como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Com relação ao número médio de transferências, a Figura 6.27 apresenta como variam os valores com relação à frota por box-plot. Apesar da grande variação dos valores para uma mesma frota, existe uma tendência de queda no número médio de transferências na média das soluções com o aumento da frota. É interessante observar que o menor valor de número médio de transferências é de uma solução com 338 veículos, e que o aumento de frota mesmo para valores acima de 400 não reduz o número médio de transferências. A explicação possível é que o aumento da frota corresponde ao uso de mais linhas e atendimento de mais nós, cuja demanda exija, em média, mais transferências.

Destaca-se que a metodologia proposta consegue encontrar excelentes soluções quanto a este indicador, já que a solução atual o número médio de transferências é 0,72 para uma frota estimada de 314 veículos e extensão média de 12,16 km, enquanto que foi encontrada uma solução com 0,48 transferência/viagem, frota de 272 veículos e extensão média das linhas de 12,99 km.

Figura 6.27: Box-plot do número médio de transferências x frota da solução para todas as soluções no Nível 3.

Fonte: Próprio autor.

Um indicador que merece uma análise mais detalhada é a extensão média das linhas. De acordo com a restrição indicada na subseção 3.5.5, no PRTP a extensão das rotas deve ser limitada por motivos operacionais. No estudo de caso, esta restrição foi incluída no algoritmo proposto pelo limite superior de 20/25/30km *para as extensões máximas das linhas* na construção do Banco Estrutural. Dessa forma, ao longo da busca, foram encontradas redes cuja *extensão média* das linhas se encontra entre aproximadamente 12,3 a 25,8 km/linha. São apresentados nos próximos parágrafos análises cruzando este com outros indicadores das soluções.

Para melhor compreender o efeito entre o número de linhas, a extensão média das linhas e o número médio de transferências nas soluções o gráfico de dispersão da extensão média e número médio de transferências por número de linhas na solução está apresentado na Figura 6.28. Nela, ressalta-se que *nas soluções cuja extensão média das linhas é maior aparecem soluções com menor número médio de transferências*. Além disso, *as soluções cujas extensões médias são menores possuem um número maior de linhas comparada às demais*.

Figura 6.28: Número médio de transferências vs distância média das linhas com relação do número de linhas na solução.

Fonte: Próprio autor.

Essa análise pode ser também visualmente confirmada na Figura 6.29. Para uma mesma frota (linha horizontal), soluções cujas extensões médias são menores possuem mais linhas. Além disso, na Figura 6.29 também se observa que, para um mesmo número de linhas, *extensões médias maiores deixam de ser competitivas com relação à frota*. A discussão pertinente neste ponto é que: *quanto maior o número de linhas, as melhores soluções quanto à frota necessária possuem as menores extensões médias dentre as soluções*. Assim, observa-se que *é necessário um esforço na busca para direcionar/limitar as extensões médias (ou o somatório total das extensões, por exemplo) das linhas*.

Figura 6.29: Dispersão da distância média das linhas e frota para diferentes números de linhas na solução.

Fonte: Próprio autor.

De modo a avaliar as soluções finais da análise de sensibilidade quanto à rede que operou no dia analisado (considerada a rede de referência de comparação), foi aplicado um filtro às soluções de fronteira. Na Tabela 6.9 estão apresentados os critérios selecionados para gerar o filtro das melhores soluções do Nível 3: demanda alocada (mais que 13.322), número médio de transferências (menor que 0,7236/viagem), tempo de viagem médio (menor que 17,38 min), frota (menor que 314), custo generalizado médio (menor que 29,83 min) e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural (menor que 33,00%).

Tabela 6.9: Atributos da Rede Atual para a mesma demanda alocada, utilizados como corte para definição do filtro das melhores soluções do Nível 3.

Atributos	Rede Atual
Demanda Alocada	13322
Número médio de transferências	0,72
Tempo de Viagem Médio (dentro do veículo) [min]	17,38
Frota	314
Custo generalizado médio [min]	29,83
Percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural	33,00%

Após o filtro, a quantidade de soluções por número de linhas na rede está apresentada na Tabela 6.10. Observam-se redes válidas a partir de 25 linhas até 44 linhas, novamente demonstrando que foram encontradas de soluções de qualidade com diferentes números de linhas. Ressalta-se que, em virtude dos dados de entrada terem sido agrupados de 5 em 5 linhas, uma maior quantidade de soluções foi encontrada com o maior número possível de linhas para aquele dado de entrada, exceto para 35-39 e 40-44 linhas. Por exemplo, do intervalo 25-29 linhas, o maior número de soluções aparece com 29 linhas (326 soluções), igualmente 30-34 (34 linhas, 380 soluções). Isso se deve pelo fato do algoritmo se beneficiar ao poder incluir mais linhas (menores valores das funções objetivo) e, portanto, a busca parece focar no máximo de linhas possível numa rodada.

De forma a apresentar este recorte de soluções a Figura 6.32 diferencia as linhas que superam a rede de referência nos critérios previamente mencionados das demais soluções. Aquelas que superam são coloridas em laranja e em azul as que não. Destaca-se o fato de que não é apenas o custo generalizado e a frota (f_1 e f_2) que separa as melhores soluções, já que o filtro do critério de percentual de demanda não-atendida também desconsidera muitas soluções.

Previamente foi apresentado o efeito das extensões médias em indicadores das soluções. A extensão média das linhas com relação ao número de linhas está apresentada antes (Figura 6.30) e depois (Figura 6.31) do filtro das soluções melhores que a rede referência. A conclusão obtida com a análise das figuras é que existe uma região do espaço de busca de soluções com mais linhas e extensões médias mais longas que não resulta em soluções melhores que a rede referência. Antes do filtro, grande parte das soluções com uma quantidade maior de linhas tinham extensões médias mais altas, enquanto que após o filtro a extensão média das linhas tem menor variação e cai com o aumento da quantidade de linhas. Essa conclusão reforça que é

necessário um esforço na busca para direcionar/limitar as extensões médias de modo a aproveitar ao máximo as regiões mais promissoras.

Tabela 6.10: Quantidade de soluções no filtro das melhores do nível 3 por número de linhas na solução.

Número de Linhas	Quantidade de Soluções no Filtro das Melhores (Nível 3)
25	16
26	7
27	19
28	111
29	326
30	22
31	55
32	160
33	260
34	380
35	98
36	104
37	154
38	226
39	221
40	80
41	63
42	92
43	51
44	63

A partir deste filtro das melhores soluções finais, foram escolhidas 5 soluções que se destacaram nos principais critérios utilizados na busca e no critério de distância média das rotas para avaliação conjunta da rede local de linhas no Nível 4:

- Menor custo generalizado médio ao usuário (função objetivo no Nível 1)
- Menor frota total (função objetivo no Nível 1)
- Menor percentual de demanda não atendida pela rede estrutural (função objetivo no Nível 2)
- Menor número de transferências médio por viagem (correspondente à função objetivo no Nível 2)
- Menor distância média das linhas

Figura 6.30: Box-plot da distância média das linhas nas soluções vs número de linhas para todas as soluções finais avaliadas no Nível 3.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.31: Box-plot da distância média das linhas nas soluções vs número de linhas para as melhores soluções no Nível 3 (atributos melhores que rede atual).

Fonte: Próprio autor.

Os comparativos das 5 redes selecionadas com a rede referência estão apresentados na Tabela 6.11. As sequências de nós das linhas estão disponíveis no *link* (<http://bit.ly/2uyshHf>). São apresentadas as comparações com diversos indicadores, sendo destacados em amarelo na coluna da esquerda os 4 atributos minimizados durante a busca do algoritmo. Considerando as soluções após o filtro das melhores redes, a rede com menor frota reduz: 26% a frota atual; 9% o custo generalizado médio, 38% o número médio de transferências e em 4% o percentual de demanda não atendida, que foram as funções objetivo selecionadas ao longo dos dois níveis de busca.

A rede com menor custo generalizado médio apresenta uma diferença de -18% com relação ao custo generalizado médio da rede atual, -48% no número médio de transferências e -20% no número de linhas. A rede com menor percentual de demanda não atendida reduz este indicador em 24% ao comparar com a rede de referência. Por sua vez, a rede com menor número médio de transferências por viagem apresenta redução de 53% neste indicador.

O indicador de maior diferença com relação a rede atual é a extensão média das linhas, que tem um valor menor na rede referência em comparação com as redes selecionadas. A rede selecionada que mais se aproxima do valor da rede atual possui 17% maior extensão média, com o benefício de 14% de redução no custo generalizado médio, 4% de redução de frota e 36% de redução no número médio de transferências e redução de 9% no tempo médio de viagem.

Com relação à extensão média das linhas, cabe ressaltar os limites desta comparação: um dos critérios adotados para uma rede ser considerada válida na metodologia apresentada é a sua conectividade, ou seja, ser possível percorrer toda a rede utilizando um número limite de transferências. No Nível 1 desta análise de sensibilidade, foi adotado o critério de que viajar entre quaisquer dos 32 terminais fosse possível utilizando até 2 transferências. A rede atual não possui esta restrição, portanto seria considerada inválida na análise. Além disso, a extensão média das linhas não foi considerada como um critério a ser minimizado diretamente durante a busca.

Como contraponto às maiores extensões médias das linhas, as frotas são menores que da rede referência em todas as soluções selecionadas. Destaque-se também a possibilidade de que, ao final do processamento, os analistas de planejamento que estejam projetando a nova rede podem dividir linhas mais longas em duas linhas mais curtas caso seja de interesse no contexto do projeto, como para melhorar o controle dos intervalos e reduzir a variabilidade dos mesmos nos pontos de parada.

Figura 6.32: Filtro das melhores soluções do Nível 3 que superam a solução atual nos seguintes critérios: demanda alocada, número médio de transferências, tempo de viagem médio, frota, custo generalizado médio e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 6.11: Comparação de indicadores selecionados das redes escolhidas para avaliação no Nível 4.

Atributos	Rede Atual	Rede com Menor Frota	Comp.	Rede com Menor Custo Generalizado Médio	Comp.	Com Menor Perc. de Demanda não atendida	Comp.	Com Menor número de trasnf. médio por viagem	Comp.	Com Menor Distância Média das Linhas	Comp.
Custo Generalizado Médio (min)	29,83	27,08	-9%	24,40	-18%	27,96	-6%	24,96	-16%	25,60	-14%
Frota	314	233	-26%	312	-1%	301	-4%	309	-2%	302	-4%
Número médio de transferências	0,72	0,45	-38%	0,37	-48%	0,51	-29%	0,34	-53%	0,46	-36%
Perc. de demanda não-atendida	33,00%	0,32	-4%	32,57%	-1%	25,24%	-24%	29,05%	-12%	32,61%	-1%
Demanda Alocada	13323	13581	2%	13407	1%	14865	12%	14107	6%	13400	1%
Número de Linhas	49	25	-49%	39	-20%	38	-22%	32	-35%	44	-10%
Número de Nós Atendidos	275	251	-9%	264	-4%	279	1%	269	-2%	257	-7%
Tempo de espera médio (min)	3,68	3,90	6%	3,79	3%	3,84	4%	3,74	2%	3,87	5%
Distância Média das linhas (m)	12163	20143	66%	18469	52%	17111	41%	23601	94%	14209	17%
Tempo médio de viagem (min)	17,38	17,34	0%	15,78	-9%	17,23	-1%	16,70	-4%	15,80	-9%

Fonte: Próprio autor.

6.3.1.3 Resultados do Projeto da Rede Estrutural (Nível 4): Avaliação conjunta com rede existente

Neste último nível a rede estrutural projetada é avaliada juntamente com as linhas locais que operaram na data de análise. Nesta análise de sensibilidade foram selecionadas 5 redes estruturais para comparação com a rede referência. Esta comparação é proposta de modo a avaliar indicadores da rede quando também consideradas as linhas que atendem aos bairros a partir dos terminais.

As 5 redes selecionadas na subseção anterior foram avaliadas com a adição das linhas locais que operaram no dia analisado. Os resultados estão apresentados Tabela 6.12. Esta etapa segue a metodologia apresentada na seção 5.7, definindo a sequência de pontos de parada das linhas, transformando a rede no formato GTFS e utilização do OTP para roteamento das viagens da matriz OD entre pontos de parada.

Para a rota no OTP, foi considerada uma partida às 01h da manhã, com tempo máximo de viagem de 3h, um número máximo de transferências de 4, uma distância máxima de caminhada de 1 km e uma distância máxima de caminhada nas transferências de 500 metros. Esses valores foram escolhidos para evitar caminhos com caminhadas longas na madrugada. Para os pares OD que não foram encontrados caminhos considerando estas restrições o OTP não gera trajeto.

Observa-se que o principal benefício dentre as variáveis analisadas com o software OTP é o número de transferências da rede. O tempo de viagem médio se mantém estável dentre as soluções, à exceção da rede com menor frota. A distância média de caminhada estimada pelo roteador do OTP foi mais alta nas soluções avaliadas. Acredita-se que este aumento seja pelo fato de as soluções proporem linhas que percorrem eixos diferentes da rede atual, portanto exigindo maiores caminhadas quando alocada a matriz OD entre pontos de parada. Não foi considerado o efeito da mudança dos locais de embarque dos usuários.

O percentual de demanda onde o roteador não gerou trajeto variou de 8,1% até 11,1%. Deve-se considerar novamente que a matriz OD de entrada é entre os pontos de parada conforme estimados pelas viagens realizadas, sem informações sobre as origens e destinos finais dos usuários. Portanto, os usuários replanejariam seus trajetos considerando as novas linhas e os pontos de parada nas proximidades do início e do fim das suas viagens.

Com base nos resultados comparativos apresentados, as estratégias de agregações da demanda para resolução do problema não geram perda de qualidade ao avaliar a demanda no nível de pontos de parada. Esta comparação, no entanto, também tem limitações. A primeira é que a demanda é estimada como uma matriz entre pontos de parada, porém, o usuário escolhe a priori um ponto para embarque com base na existência de linhas para sua viagem; caso a rede seja diferente, é possível que o ponto de embarque do usuário seja outro.

Em segundo lugar, parte-se de uma rede de linhas locais fixa e já existente, tendo sido projetada para funcionar em conjunto com uma rede estrutural específica. Portanto, com uma mudança da rede estrutural, sugere-se a reavaliação das linhas locais de forma que o conjunto das linhas seja otimizado.

6.3.2 *Número de terminais operantes na rede*

Além da Análise de Sensibilidade apresentada na seção anterior, foram realizados experimentos para avaliar o efeito da desativação de terminais na rede, ou mesmo o aumento do número de terminais utilizados. Foram realizados testes considerando entre 28 e 33 terminais, sendo que atualmente a Rede da Madrugada de São Paulo opera com 32 terminais.

Os terminais escolhidos para remoção foram: Guarapiranga, Casa Verde, Carrão, Aricanduva e A.E. Carvalho, em virtude da baixa movimentação de passageiros registrada e também pela proximidade com outros terminais na região. O terminal escolhido para adição na configuração com 33 terminais se localiza próximo à Avenida Luís Carlos Berrini, no nó ID 52, latitude: -23,6134 e longitude: -46,6963, devido a ser uma região distante dos terminais mais próximos.

Para esta análise, os dados de entrada para a metodologia são aqueles previamente apresentados na Tabela 6.2. Após aplicação da metodologia e cálculo dos indicadores obtidos no Nível 3, a Tabela 6.13 apresenta a mediana dos valores das soluções encontradas. O destaque é a menor frota conforme se reduz o número de terminais. No entanto, observa-se um aumento no número de transferências e custo generalizado principalmente de 29 para 28 terminais. Considerando que em geral a variação observada nos demais indicadores é baixa, esse resultado indica que *existe potencial de alteração no número de terminais de modo a encontrar outras soluções de equilíbrio considerando custos dos operadores e usuários*.

Tabela 6.12: Atributos das redes selecionadas para avaliação no Nível 4, ao se agregar as linhas da rede estrutural propostas com as linhas locais existentes na rede atual.

Atributos da rede (com linhas locais idênticas à rede atual) após análise Nível 4	Rede Atual codificada com linhas locais	Rede com Menor Frota	Comp.	Rede com Menor Custo Generalizado Médio	Comp.	Com Menor Perc. de Demanda não atendida	Comp.	Com Menor número de trasnf. médio por viagem	Comp.	Com Menor Distância Média das Linhas	Comp.
Número de transferências	13809	12781	-7%	11318	-18%	12810	-7%	10977	-21%	11983	-13%
Tempo de viagem total médio	42,4	45,3	7%	41,5	-2%	42,9	1%	41,8	-1%	42,3	0%
Média distância de caminhada	800	889	11%	832	4%	841	5%	838	5%	839	5%
Percentual da demanda OTP sugere caminhar	8,0%	8,7%	--	8,2%	--	8,2%	--	8,2%	--	8,2%	--
Percentual da demanda OTP não gera trajeto	7,1%	11,1%	--	8,1%	--	9,1%	--	8,1%	--	11,1%	--
Número de Linhas	150	126	-16%	140	-7%	139	-7%	133	-11%	145	-3%

Tabela 6.13: Mediana dos valores para indicadores selecionados de todas as soluções no Nível 3 (após alocação no EMME).

Número de Terminais	28	29	30	31	32	33
Demanda Alocada	13.209	13.178	13.095	12.911	13.054	13.190
Número de linhas médio por pass.	1,46	1,45	1,44	1,45	1,45	1,44
Número médio de transferências	0,46	0,45	0,44	0,45	0,45	0,44
Tempo médio de viagem	16,64	16,48	16,43	16,34	16,32	16,56
Tempo médio de espera	3,80	3,79	3,77	3,76	3,78	3,76
Frota	259	264	264,5	265	267	276
Custo generalizado médio	26,22	25,87	25,72	25,66	25,70	25,99
Número de linhas na solução	33	33	34	34	34	34
Número de nós atendidos	251	250	252	254	257	258
Número de transferências	6101,7	5997,8	5760,9	5869,1	5901,3	5802,7
Perc. da demanda não-atendida	34%	34%	34%	35%	34%	34%
Demanda total	23.717	23.717	23.717	23.717	23.717	23.717

A Figura 6.33 apresenta a matriz de dispersão para frota, média de custo generalizado e percentual da demanda não-atendida pela rede estrutural para números de terminais na rede variando entre 28 e 33 para todas as soluções na fronteira de Pareto finais do Nível 2 após alocação da demanda e cálculo da frota no Nível 3. A tendência observada é que *com a redução no número de terminais a frota tende a reduzir, apesar do aumento do custo generalizado, porém com a vantagem de não impactar significativamente a demanda não-atendida.*

Estes resultado demonstra que o algoritmo desenvolvido permite a avaliação da modificação do número de terminais na rede e que no estudo de caso realizado há alternativas de atendimento a proporções semelhantes de demanda com a utilização de menos terminais como base, que pode tornar a rede menos custosa para operação ao se reduzirem os terminais fixos operantes. Há de se ressaltar que esta opção gera maiores custos generalizados aos usuários. Além disso, deve-se considerar que na eventual remoção da operação de um terminal as linhas locais que utilizam aquele terminal devem ser reprojctadas para a nova configuração.

6.3.3 Número de linhas máximas no Banco Itinerários

O número de possibilidades de itinerários entre dois terminais tende a aumentar exponencialmente em função da distância entre eles pelo maior número de caminhos possíveis no sistema viário. Conforme apresentado no pseudocódigo da Figura 5.17, a inclusão de um itinerário no Banco Itinerários é realizada apenas após validação de critérios de inserção. Portanto, para incluir muitas linhas, é necessária uma busca muito extensa nos k caminhos

mínimos entre cada par de terminais. Desta forma, foram realizados testes considerando uma busca de itinerários entre terminais para formar:

- 10 linhas no banco Itinerários buscando até $k = 30$ mil caminhos;
- 20 linhas no banco Itinerários buscando até $k = 40$ mil caminhos;
- 30 linhas no banco Itinerários buscando até $k = 50$ mil caminhos;

Figura 6.33: Efeito do número de terminais adotados na solução nas funções objetivo custo generalizado médio e frota, assim como no percentual da demanda não atendida pela rede estrutural, para número de terminais variando de 28 a 33.

Fonte: Próprio autor.

Antes de avaliar o efeito da utilização de mais linhas nos Bancos Itinerários nas soluções finais, são apresentadas análises quanto ao Banco Itinerário em si. A Figura 6.34 apresenta a demanda média das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máxima por

par, agregadas por terminal de origem. Observa-se *um aumento na demanda média das linhas conforme são admitidas mais rotas no Banco Itinerários*. Isso ocorre pois o algoritmo de inclusão de novas rotas no Banco Itinerários continua incluindo mais rotas que tenham maior demanda potencial com o aumento do k .

Figura 6.34: Demanda média das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máxima por par.

Fonte: Próprio autor.

Em contrapartida, a Figura 6.35 apresenta a média do tempo de viagem das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máximas por par, agregados por terminal de origem. Com um maior número de linhas no Banco, *o tempo de viagem médio das linhas é maior*, uma vez que as novas linhas desviam mais do caminho mais curto. Além da questão do tempo de viagem, deve-se salientar que o aumento do número de possibilidades no Banco Itinerários também aumenta substancialmente o espaço de busca do Genético Itinerários.

Figura 6.35: Média do tempo de viagem das linhas no Banco Itinerários para diferentes valores de k rotas máximas por par.

Fonte: Próprio autor.

O fato de aumentar o k máximo não implica necessariamente em um aumento no tamanho do Banco. A Tabela 6.14 apresenta o número médio de linhas no Banco Itinerários, agrupado por terminal de origem, para as combinações apresentadas anteriormente de 10/20/30 linhas com até 30/40/50 mil itinerários buscados. Observa-se que para o limite de 10 linhas, todos os terminais apresentam médias superiores a 8 linhas no Banco Itinerários, ou seja, próximo do limite máximo de 10 linhas adotado. Com o aumento do k para 30, embora sejam buscados até 50 mil caminhos distintos, na média não são preenchidas estas 20 possibilidades adicionais. O terminal Vila Madalena, por exemplo, apresenta a menor média com apenas 13,8 linhas para k=30.

No Banco Itinerários de 10 itinerários máximos por par, o percentual de pares de terminais que contém o máximo de 10 linhas no Banco Itinerários é de 76,6%. Este percentual de pares de terminais que atinge o número máximo possível de trajetos cai para 50% no caso de 20, e apenas 17,9% para o caso de 30 linhas. No Banco Itinerários com k=30 linhas, 73% dos pares

possuem mais de 10 linhas no Banco, ao passo que apenas 31% tem mais de 25 linhas. Este resultado indica que *o impacto do aumento do número de possibilidades de itinerários varia para cada par de terminais*, principalmente devido ao sistema viário que os conecta e a distância entre eles.

Tabela 6.14: Número médio de linhas no Banco Itinerários, agrupado por terminal de origem, para diferentes k máximos de linhas.

Terminal		k Máximo no Banco Itinerários		
Nó Origem	Nome	10	20	30
18	Vila Madalena	8,5	12,8	13,8
41	Butantã	8,5	13,5	15,5
71	Guaianazes	8,6	15,9	19,7
73	Capelinha	8,4	15,3	19,1
75	Campo Limpo	8,0	14,1	17,2
76	João Dias	8,3	14,9	17,8
77	Jd. Ângela	8,4	15,7	22,6
78	Guarapiranga	8,2	14,9	18,2
85	Grajaú	8,8	16,2	21,5
94	Santo Amaro	8,0	13,3	15,2
106	Jabaquara	9,2	15,2	17,7
142	Pirituba	9,2	16,0	18,9
153	Vl. Nova Cachoeirinha	8,9	15,4	18,9
158	Casa Verde	9,1	15,9	20,9
171	Tucuruvi	9,3	15,3	18,0
179	Santana	8,9	15,1	19,3
215	Vila Mariana	9,0	14,5	17,1
218	Sacomã	9,3	15,9	18,6
237	Barra Funda	9,0	15,6	19,9
244	Lapa	8,5	14,8	18,9
246	Pq. D. Pedro II	9,2	14,1	16,0
273	Sapopemba	8,6	14,4	17,5
274	São Mateus	8,6	14,6	18,0
279	Cid. Tiradentes	8,7	16,1	21,3
285	Carrão	9,1	14,8	17,7
293	Aricanduva	9,0	15,5	18,3
298	Penha	9,4	16,3	20,1
313	A.E. Carvalho	8,9	14,3	16,9
318	São Miguel	9,4	15,7	18,7
324	Itaquera	8,7	15,0	19,0
335	Pinheiros	9,0	14,3	16,5
341	Belém	9,1	14,8	16,8

A Figura 6.36 apresenta a matriz de dispersão para quantidade de nós não atendidos pela rede estrutural, percentual de 2 ou mais transferências e número de transferências para todas as soluções finais do Nível 2, considerando quantidade k máxima de linhas no Banco Itinerário para classificação. Para esta análise, os dados de entrada para a metodologia estão apresentados na Tabela 6.2. Observa-se que no caso de $k=30$ houve uma maior quantidade de soluções com percentual mais baixo de demanda não atendida (centro), ou seja, em virtude da permeabilidade dos itinerários nos nós do sistema viário ser maior foram encontradas mais soluções que reduzem o número de transferências.

A Figura 6.37 mostra a matriz de dispersão entre frota, custo generalizado e percentual da demanda não-atendida. É possível observar que, na média, as soluções com maiores k tendem a atender mais demanda na rede (histograma inferior direito), porém sem uma tendência de modificação quanto às variáveis frota total e custo médio generalizado. Considerando os valores para as 3 variáveis da rede de referência de comparação, *o algoritmo demonstrou encontrar soluções válidas e de boa qualidade para os 3 valores de k avaliados.*

Por último, a Figura 6.38 mostra o tempo médio de viagem após o Nível 3 em comparação com o número máximo k de rotas no Banco Itinerários. Em geral, as soluções com maior número k de rotas no Banco Itinerários tendem a apresentar tempos médios de viagem mais longos, refletindo os maiores tempos médios observados nas linhas no Banco (Figura 6.35). Apesar disso, os outliers demonstram que também foi possível encontrar soluções com tempos médios de viagem menores com maior valor de k .

Pelo analisado, sugere-se um aumento no valor de k adotado como uma estratégia para encontrar soluções que atendem um maior percentual de demanda pela rede estrutural caso seja de interesse no contexto do projeto.

Figura 6.36: Matriz de dispersão para quantidade de nós não atendidos pela rede estrutural, percentual de 2 ou mais transferências e número de transferência para todas as soluções finais do Nível 2, considerando quantidade k máxima de linhas no Banco Itinerário para classificação.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.37: Matriz de dispersão considerando frota, custo generalizado médio e percentual da demanda não atendida pela rede estrutural para todas as soluções do Nível 3, considerando k máximo de linhas como agrupamento.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.38: Tempo médio de viagem nas melhores soluções no Nível 3 x número máximo k de rotas no Banco Itinerários.

Fonte: Próprio autor.

6.3.4 Demanda da Rede

Esta seção busca avaliar a robustez das soluções geradas pelo algoritmo com relação à variabilidade da demanda. Neste trabalho o termo “robustez” corresponde à definição apresentada por Snyder (2006), que diz que uma solução é robusta quando ela apresenta bom desempenho mesmo quando sujeita à variação dos parâmetros. Segundo Snyder (2006), soluções robustas são as que apresentam um bom desempenho em diferentes condições. O autor indica que “bom desempenho” varia de aplicação a aplicação, e escolher uma medida apropriada de desempenho é parte do processo de modelagem.

No caso do projeto de redes de transporte público por ônibus, a demanda de viagens apresenta variações ao longo das horas do dia, dos dias da semana e ao longo dos meses do ano. De modo a analisar a robustez da rede projetada pelo algoritmo, nesta seção avaliam-se indicadores de número médio de transferências e percentual da demanda não-atendida pela rede

estrutural das soluções finais ao realizar a alocação da demanda para diferentes dias da semana. Não foi utilizado o custo generalizado total como medida de desempenho pois este indicador é bastante dependente das distâncias percorridas pelos usuários, portanto não seria possível dissociar das variações presentes ao longo da semana.

Inicialmente, foram realizadas 5 rodadas utilizando a demanda na faixa horária de 00h30-01h30 na madrugada de uma quarta-feira para quinta-feira do dia 27/06/2019, com os parâmetros apresentados na Tabela 6.2. As melhores soluções obtidas, ou seja, aquelas pertencentes à Fronteira de Pareto no Nível 2, tiveram a demanda de cada um dos 7 dias da mesma semana de junho de 2019 (dia 24 ao dia 30) alocada. Conforme mostrado na Tabela 6.15, a demanda de viagens nesta faixa horária da madrugada é bastante variável ao longo da semana. Desta forma, foi possível obter os indicadores de qualidade da rede após alocação para os 7 dias.

Tabela 6.15: Número de viagens na faixa horária de 00h30-01h30 ao longo da semana analisada.

Dia	Número de Viagens (00h30-01h30)
24/06/2019	3 946
25/06/2019	4 732
26/06/2019	4 987
27/06/2019	7 395
28/06/2019	9 511
29/06/2019	14 063
30/06/2019	12 472

A demanda utilizada para otimização da rede foi a do dia 27/06/2019. A Figura 6.39 apresenta o número médio de transferências para todas as soluções finais das 5 rodadas para a demanda de cada um dos 7 dias ao longo de uma semana típica. Observa-se uma proximidade dos resultados das melhores soluções entre as rodadas. Além disso, a variação deste indicador ao longo desta semana é baixa. Esse resultado indica uma consistência da rede projetada para a demanda dos diferentes dias desta semana quanto a este indicador.

Já na Figura 6.40 estão apresentados os números médios do percentual de demanda não-atendida pela rede estrutural para todas as soluções finais das 5 rodadas após alocação à demanda de cada um dos 7 dias ao longo de uma semana típica. Observa-se uma maior consistência nos valores deste indicador para as soluções finais obtidas em todas as rodadas. Adicionalmente, a *variação deste indicador é bem reduzida para a demanda da madrugada ao longo dos dias da semana selecionada para avaliação da rede.*

Ressalta-se que estes indicadores são fortemente dependentes do padrão da demanda, ou seja, das origens e destinos e seus respectivos volumes de viagens. Apesar do volume de viagens bem distinto entre os dias (Tabela 6.15), as redes projetadas pela metodologia apresentada neste trabalho mantiveram robustez com relação a estes indicadores avaliados.

Embora não seja uma análise exaustiva, esta seção apresentou uma avaliação da robustez das soluções propostas no estudo de caso com relação ao número médio de transferências e demanda não-atendida pela rede.

Figura 6.39: Número médio de transferências para todas as soluções finais de 5 execuções, para demandas da faixa horária de 00h30 até 01h30 para 7 dias ao longo de uma semana típica.

Fonte: Próprio autor.

Figura 6.40: Percentual de demanda não atendida pela rede estrutural para todas as soluções finais de 5 rodadas, para demandas da faixa horária de 00h30 até 01h30 para 7 dias ao longo de uma semana típica.

Fonte: Próprio autor.

6.4 Resumo do Capítulo de Experimentos Computacionais

Este Capítulo apresentou a aplicação da metodologia proposta através de experimentos computacionais do problema de projeto da rede estrutural de ônibus para operação na madrugada na cidade de São Paulo. Foram apresentados os resultados para 4 análises de sensibilidade distintas, considerando: a) o número de linhas na rede, a extensão máxima das linhas e o desvio máximo do tempo de viagem em relação ao tempo mais rápido; b) o número de possibilidades de itinerários; c) número de terminais operando na rede e d) a avaliação de diferentes matrizes de demanda na rede. Nesta seção são apresentadas as limitações dos experimentos realizados e destacadas as principais conclusões.

As principais limitações dos experimentos realizados incluem a utilização de uma única rede para avaliação do algoritmo e a falta de uma calibração fina dos parâmetros dos Genéticos utilizados. A utilização de uma única rede para avaliação do algoritmo se deu principalmente pela não-existência deste tipo de instância de teste na literatura científica e pela dificuldade de adaptação das instâncias existentes. Assim, modelou-se a parcela estrutural de uma rede tronco-alimentada para a rede da madrugada de São Paulo para aplicação do algoritmo. O esforço de criação de uma instância como a utilizada nesta tese é elevado tanto em termos de disponibilização de dados e da construção manual da rede (seleção dos nós estruturais e representação das vias estruturais existentes). De toda forma, a escolha e construção da instância reflete o tamanho de problema real e é diretamente generalizável para outras cidades que possuem terminais de transporte urbano.

Não foram explorados os efeitos da mudança nos parâmetros dos Algoritmos Genéticos em si uma vez que seria necessária uma calibração específica para cada experimento executado, portanto, buscou-se avaliar prioritariamente como os parâmetros de projeto da rede estrutural influenciam as soluções. Recomenda-se a calibração dos parâmetros do Genético (tamanho da população, tempo de processamento, percentual de reprodução e mutação) caso a caso na aplicação da metodologia. Uma estratégia possível é o tamanho da população ser diretamente proporcional ao tamanho dos Bancos Estruturais e Itinerários de forma a explorar o maior número de possibilidades nas buscas.

Considerando as limitações apresentadas, as Análises de Sensibilidade conduzidas neste trabalho evidenciaram resultados importantes destacados ao longo do capítulo e exemplificaram novas formas de análise das soluções que contribuem significativamente para

o P RTP por pesquisadores e planejadores de transporte. Em resumo, esses resultados da aplicação do algoritmo proposto no estudo de caso são reproduzidos na lista a seguir:

1. *Um maior número de rotas candidatas advindas com o aumento da extensão máxima e desvio do tempo mínimo é benéfico pelo ponto de vista de permitir mais possibilidades de ligações durante a busca, entretanto, pode prejudicar a eficiência da mesma pelo maior número de possibilidades e/ou ao incluir um número maior de linhas longas nas soluções;*
2. *Soluções com mais linhas na rede não necessariamente correspondem a uma redução significativa das extensões médias das linhas;*
3. *É possível obter soluções de equilíbrio de boa qualidade para diferentes números de linhas na rede;*
4. *É importante a avaliação de desvios máximos de tempo de viagem inclusive de até 50% por trazer soluções de boa qualidade apesar dos desvios;*
5. *O aumento do desvio máximo tende a promover um efeito benéfico na redução do custo generalizado da rede (considerando o limite de até 50% avaliado);*
6. *A busca no Nível 1 consegue direcionar as soluções para patamares similares da função objetivo custo generalizado;*
7. *A análise de sensibilidade permite encontrar características comuns das soluções de equilíbrio competitivas quanto ao custo generalizado e frota total*
8. *A extensão média das linhas diminui significativamente com o aumento do número de linhas ao se considerar apenas o filtro das melhores soluções de equilíbrio no Nível 1;*
9. *A busca por soluções de diferentes números de linhas na rede deve idealmente restringir as extensões das rotas de forma a direcionar a busca ao espaço de soluções onde são encontradas as melhores soluções de equilíbrio;*
10. *A análise de linhas e ligações mais comuns entre terminais permite saber quais rotas ocorreram com maior frequência, evidenciando as mais prioritárias e importantes que levaram aos melhores resultados de custos generalizados e frota;*
11. *É importante a avaliação do atendimento de 3 e até 4 terminais em uma linha estrutural devido ao grande número de linhas que atendem esta quantidade de terminais no conjunto das linhas mais utilizadas nas melhores soluções;*
12. *As ligações diretas mais encontradas nas soluções indicam trechos entre terminais que possivelmente são melhor atendidos com duas ou mais linhas estruturais conectando-os;*

13. *O percentual que uma ligação direta aparece nas melhores soluções permite avaliar a importância de ligações diretas específicas entre terminais com base nas características das linhas das melhores soluções de equilíbrio;*
14. *O aumento do número de linhas como dado de entrada tende a gerar um número menor de transferências e uma menor quantidade de nós não-atendidos pela rede estrutural;*
15. *Desvios maiores tendem a reduzir o número de transferências na rede e do número de nós não-atendidos, com uma maior extensão média das linhas;*
16. *No Nível 2 observa-se distintos números de linhas das soluções na fronteira de Pareto entre número de transferências $\times$ frota, indicando novamente que existem soluções de qualidade para diferentes números de linhas na rede;*
17. *Não é significativa a redução no número de transferências com o aumento do número de nós atendidos a partir de um determinado número de nós;*
18. *No Banco Itinerários a ordem de menores tempos de viagem não é a ordem de frequência de uso daquele itinerário nas melhores soluções, indicando a importância da avaliação da demanda potencial dos trajetos e não apenas o tempo de viagem;*
19. *O algoritmo proposto consegue gerar soluções válidas para a rede estrutural que utilizam menos frota quando comparados ao valor da rede de referência para comparação do estudo de caso.*
20. *Apesar das redes com menos linhas apresentarem frota menor, o percentual de atendimento da demanda tende a ser pior;*
21. *Os valores de custo generalizado médio são muito próximos quando analisados diferentes números de linhas como dado de entrada, porém existe a tendência de que com mais linhas na solução a frota necessária tende a ser maior, com o benefício de um atendimento maior a demanda.*
22. *O algoritmo proposto evidencia o trade-off existente no PRTP entre número de linhas na solução, custo generalizado médio, frota necessária para operação e percentual da demanda não-atendida;*
23. *A metodologia permite gerar soluções válidas ao problema, com indicadores que superam a rede de referência de comparação em vários indicadores, incluindo redução do custo generalizado total, da frota, do número médio de transferências e do número de linhas na rede;*
24. *Nas soluções cuja extensão média das linhas é maior aparecem soluções com menor número médio de transferências. Além disso, as soluções cujas extensões médias são menores possuem um número maior de linhas comparada às demais;*

25. *Extensões médias maiores deixam de ser competitivas com relação à frota. Adicionalmente, quanto maior o número de linhas, as melhores soluções quanto à frota necessária possuem as menores extensões médias dentre as soluções. Assim, destaca-se que é necessário um esforço na busca para direcionar/limitar as extensões médias (ou o somatório total das extensões, por exemplo) das linhas;*
26. *Quanto ao número de terminais na rede, existe potencial de alteração no número de terminais de modo a encontrar outras soluções de equilíbrio considerando custos dos operadores e usuários, porém com trade-offs definidos, ou seja, ao se reduzir o custo operacional ocorre aumento dos custos dos usuários e vice-versa;*
27. *Com a redução no número de terminais a frota tende a reduzir, apesar do aumento do custo generalizado, porém com a vantagem de não impactar significativamente a demanda não-atendida.*
28. *Quanto à possibilidade de construção dos itinerários, ocorre um aumento na demanda média das linhas conforme são admitidas mais rotas no Banco Itinerários, no entanto, o tempo de viagem médio das linhas é maior;*
29. *O impacto do aumento do número de possibilidades de itinerários varia para cada par de terminais em função do número de possibilidades de trajetos entre eles;*
30. *O algoritmo demonstrou encontrar soluções válidas e de boa qualidade para os 3 valores de k (10/20/30) avaliados;*
31. *Com relação à variação da demanda na rede, os números médios do percentual de demanda não-atendida pela rede estrutural variaram pouco para todas as soluções finais após alocação da demanda de cada um dos 7 dias ao longo de uma semana típica;*

Este capítulo apresentou como a metodologia desenvolvida permite aprimorar e contribuir para gerar soluções otimizadas para o problema de projeto de redes estruturais de transporte público coletivo por ônibus. Foi possível demonstrar que a metodologia permite gerar soluções válidas ao problema, com características que superam a rede que operou no dia analisado em vários indicadores, com redução do custo generalizado total, da frota, do número médio de transferências e do número de linhas na rede, com um pequeno aumento na extensão média das linhas.

7 CONCLUSÕES FINAIS

O problema do projeto de redes de transporte público (PRTP) envolve a definição do itinerário de linhas e suas frequências de operação de modo a atingir objetivos de redução dos custos dos usuários e dos operadores. Sua natureza multiobjetivo e explosão combinatória dificulta a definição de uma única solução ótima. O problema tem sido objeto de pesquisa desde a década de 60 com o trabalho de Lampkin e Saalmans (LAMPKIN; SAALMANS, 1967) e nos últimos 20 anos tem recebido maior atenção tanto de pesquisadores das áreas de computação e de planejamento de transportes.

No entanto, apesar da evolução das metodologias ao longo do tempo, se constatou um *gap* entre os problemas de projeto de redes de transporte em regiões urbanas de médio e grande porte e as escalas de aplicação, dados de entrada e as simplificações adotadas nas metodologias na literatura científica. Nesse sentido, este trabalho apresenta uma nova metodologia para resolução do PRTP que projeta linhas estruturais de transporte público coletivo por ônibus para áreas urbanas, aproximando mais a literatura científica de PRTP às características dos problemas reais de projetos de rede em regiões com infraestrutura baseada no conceito de redes tronco-alimentadas de transporte.

Utilizaram-se dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento de veículos para a elaboração da matriz origem-destino das viagens na resolução entre pontos de parada do sistema. A metodologia proposta se baseia em algoritmos de buscas evolutivas no espaço de soluções utilizando a meta-heurística Algoritmos Genéticos, em 4 níveis: no primeiro é definido o número de linhas e a sequência de terminais de transporte a serem atendidos; no segundo é definido o itinerário de cada linha da rede estrutural. No terceiro, são calculadas as frequências de operação necessárias para atendimento da demanda, a frota para operação da rede e é estimado o custo generalizado médio por usuário. Por fim, no quarto nível avaliam-se as linhas estruturais conjuntamente com linhas locais que compõem a estrutura tronco-alimentada de rede utilizando a matriz de demanda mais desagregada, entre pontos de parada.

A metodologia foi aplicada no projeto da rede estrutural para operação no período da madrugada em São Paulo, representada através de um grafo construído para este fim com 601 links bidirecionais, 343 nós, sendo 32 deles nós correspondentes a terminais de ônibus. Resultados da análise de sensibilidade realizada demonstram que o projeto das linhas estruturais pela metodologia proposta permite a redução dos custos generalizados dos usuários, da frota,

assim como também do número médio de transferências e do percentual de demanda não-atendida pela rede. Cinco soluções foram selecionadas dentre as melhores da análise de sensibilidade, sendo que uma destas soluções apresentou bom *trade-off* dos atributos e reduz: o custo generalizado médio das viagens no sistema estrutural em 14%, a frota em 4% e o número médio de transferências em 36% com relação à rede atual. Assim, a metodologia proposta tem potencial de gerar soluções para o projeto de linhas estruturais com ganhos significativos tanto para os passageiros como na redução dos custos operacionais.

Também foram realizados experimentos para avaliar a mudança da quantidade de terminais na qualidade das soluções, diferentes quantidades possíveis de itinerários entre os terminais, assim como a robustez das soluções quanto à demanda variável ao longo de uma semana. Estes experimentos demonstraram a possibilidade da metodologia de auxiliar a tomada de decisão do projeto de rede quanto a estes atributos.

Na próxima seção deste capítulo, são apresentadas as contribuições desta pesquisa considerando o panorama recente de pesquisa no tema. Posteriormente, são apresentadas as limitações com direcionamento para trabalhos futuros.

7.1 Contribuições

As contribuições desta tese abrangem:

- (i) metodologia projeto de redes de transporte público (PRTP) aplicada a sistemas tronco-alimentados para definição de linhas estruturais de ônibus que separa o problema em partes, solucionadas por Algoritmos Genéticos com funções objetivo alternantes que buscam explorar as melhores soluções de equilíbrio do problema;
- (ii) heurística de construção dos bancos de rotas estruturais e itinerários entre os terminais desenvolvida sob medida para o problema;
- (iii) estimação de matriz origem-destino para ser utilizada para fins de planejamento de rede de transporte público, utilizando dados de bilhetagem eletrônica e GPS de ônibus em um nível de resolução espacial entre pontos de parada do sistema que também considera características da localização da catraca dos sistemas de ônibus brasileiros;

- (iv) construção e disponibilização de uma instância de rede de sistema de transporte público por ônibus tronco-alimentado com dezenas de terminais em uma extensa área urbana para fins de pesquisa metodológica;
- (v) análise de sensibilidade que avalia diversos aspectos do PRTP, incluindo número de linhas na rede, extensão das linhas, linearidade das rotas, número de terminais e robustez da rede frente à diferentes demandas, com análise das características das melhores soluções obtidas gerando *insights* que auxiliam a tomada de decisão do PRTP;
- (vi) avaliação do projeto da rede em um nível de desagregação elevado, entre pontos de parada, ou seja, as soluções que normalmente na literatura científica são geradas no formato de sequência de nós foram detalhadas para sequência de pontos de parada e modelagem da solução final no formato GTFS.

Como contribuição à literatura científica está a metodologia de projeto de redes de transporte público (PRTP) aplicada a sistemas tronco-alimentados para definição de linhas estruturais de ônibus utilizando dois Algoritmos Genéticos com funções objetivo alternantes para a configuração das rotas. Propõe-se esta metodologia nova na literatura que resolve o problema separando a definição do número de linhas e das ligações entre os terminais do itinerário das linhas aplicando duas meta-heurísticas sequencialmente. Os resultados apresentados demonstraram que a metodologia encontra soluções de equilíbrio de qualidade quando comparadas com a rede de referência do estudo de caso.

Como parte do método a proposta de heurísticas de construção das ligações entre terminais e itinerários das linhas estruturais é uma contribuição por ser específica e adaptada ao problema. A heurística filtra potenciais itinerários candidatos dentre um número elevado de k caminhos mínimos que sejam competitivos quanto ao tempo de viagem, número de caminhos diferentes entre os pares de terminais conectados e demanda potencial no trajeto. Não foi encontrada na literatura do PRTP tal heurística de construção de itinerários.

Em geral na literatura a matriz origem-destino utilizada é sempre considerada como um dado de entrada sem discussões sobre seu nível de agregação, origem e influência nos resultados do projeto da rede. Esta tese apresenta método de construção de matrizes origem-destino entre pontos de parada adaptada da literatura e é feita uma análise da robustez da rede. Não foram encontradas na literatura científica esta mescla entre elaboração de matrizes OD por dia e os efeitos no projeto da rede.

Quanto à instância, devido à dificuldade encontrada com relação à disponibilidade de instâncias para avaliação da metodologia para o projeto de redes estruturais em sistemas tronco-alimentados, uma contribuição à literatura científica é a disponibilização da instância criada para a rede da madrugada para desenvolvimento de novas metodologias por outros pesquisadores no âmbito acadêmico (ARBEX, 2020). Esta instância reflete características de um problema real com um tamanho maior que as instâncias existentes e permitirá a aplicação de metodologias por outros pesquisadores para comparação de resultados e avanço do conhecimento científico nesta área.

A metodologia apresentada também preenche uma lacuna observada na literatura quanto às discussões com relação à demanda não-atendida pela rede, extensão média das linhas, número médio de transferências assim como os reflexos nestes indicadores das diversas escolhas do projeto da rede (número de linhas, extensão máxima das linhas, desvio máximo de tempo de viagem, número de terminais, demanda de diferentes dias). Além disso, a avaliação das características das melhores redes nas soluções de equilíbrio na análise de sensibilidade contribui com ferramentas para auxílio na avaliação das ligações entre terminais prioritárias na rede.

Apresentou-se também uma forma de abordar o PRTP em um nível de desagregação elevado: até o nível de ponto de parada, tanto para oferta como para a demanda. Na oferta, a rede final é definida como sequência de pontos de parada, e a demanda é estimada entre pontos de parada com base na estimação de matriz origem-destino a partir de dados de bilhetagem eletrônica e GPS de ônibus. Considerando a geração de cada vez mais dados desagregados em grande volume pelos sistemas de transporte público no Brasil e no mundo, a sua incorporação no processo de planejamento da rede permite a elaboração de sistemas de transporte público mais atrativos para a população em um ciclo de planejamento mais rápido devido à continuidade da coleta dos dados. Pelo fato da maioria dos trabalhos na literatura tratar o sequenciamento final das linhas como nós do grafo da rede simplificada, esta etapa final de detalhamento com sequência de pontos de parada e construção da rede no formato *General Transit Feed System* (GTFS) é uma das contribuições para aproximar o projeto das linhas à sua implementação final.

Com base no panorama geral das contribuições, esta pesquisa apresenta avanços para a literatura científica do PRTP oferecendo subsídios à tomada de decisão necessária a implantação de sistemas de transporte público eficientes.

7.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Há de se destacar as limitações pertinentes a este estudo. O problema de projeto de redes de transporte público é bastante complexo, sendo necessárias simplificações de forma a permitir a busca no espaço de soluções com uma eficiência computacional aceitável. Este é um desafio em projetos de rede de PRTP que deve ser considerado nos métodos para sua eficácia.

O escopo desta tese se restringiu ao projeto de uma rede estrutural de transporte público coletivo por ônibus em uma região urbana. Uma das limitações foi a impossibilidade de aplicação da metodologia proposta a mais de uma única instância de teste: aplicou-se o algoritmo apenas à rede da madrugada de São Paulo principalmente devido à dificuldade de obtenção de instâncias semelhantes na literatura científica, assim como devido à complexidade de construção de outras instâncias, principalmente devido às restrições de disponibilidade de dados sobre demanda e oferta de transporte público das cidades. Sob este aspecto, como trabalho futuro é sugerido que o método seja avaliado em mais instâncias, com características:

- a) Que representem realisticamente o sistema de transporte público de outras cidades brasileiras/mundiais, com a consideração da existência de terminais de ônibus pré-existentes ou locais apropriados para início e término de linhas, conforme foi aplicada à instância de São Paulo;
- b) De outros horários de demanda, como hora pico da manhã de dias úteis, ou mesmo propor uma rede de transporte para diferentes dias, como aos domingos;
- c) Outros períodos de demanda, a partir da extração dos padrões de demanda para diferentes semanas e meses. Dessa forma, a rede projetada melhor atende a demanda ao longo de todo ano na região de interesse;

Outra limitação está relacionada à infraestrutura de transporte público previamente existente na região. Neste estudo estes serviços de transporte não foram considerados, portanto, para o futuro sugere-se enriquecer a metodologia de forma a considerar a prévia existência de infraestrutura física dedicada como linhas de sistemas baseadas em trilhos (metrô, trens e veículos leves sobre trilhos), *bus rapid transit* (BRT) e/ou linhas de ônibus estruturais já existentes. De fato, é um trabalho futuro a possibilidade de adaptação do algoritmo para permitir a modificação parcial de uma rede existente, ou seja, permitir a inclusão de linhas que já operam e não devem ser modificadas na otimização da rede.

Com relação à capacidade do sistema e das velocidades dos ônibus nas vias, principalmente para horários de pico de demanda durante o dia, é importante avaliar a

capacidade viária e a velocidade operacional prevista para cada via em função do volume de veículos e do tipo de via (segregada, preferencial ou tráfego misto). A remoção desta simplificação usual da literatura é recomendada como trabalho futuro para obtenção de soluções mais próximas das condições operacionais reais. Na aplicação proposta através do estudo de caso desta tese, a velocidade mantida fixa é uma simplificação de baixo impacto, já que no período da madrugada analisado os ônibus não enfrentam congestionamentos relevantes e recorrentes nas vias.

Além disso, a inclusão da capacidade dos terminais é uma recomendação para trabalhos futuros. Deve-se restringir o número de linhas que podem iniciar ou finalizar nos terminais em função das capacidades físicas deles em termos de número de baias e área de estocagem de veículos.

Com relação à matriz de demanda, para o futuro é sugerido que seja avaliado tanto o aprimoramento do dado de entrada com a investigação da variabilidade da demanda observada em diferentes dias e meses, assim como o efeito de demanda do transporte público variável em relação ao nível de serviço observado frente ao transporte individual motorizado.

Quanto aos tipos de veículos, sugere-se incluir a possibilidade de a metodologia definir qual o tipo de veículo a ser adotado na linha em função da demanda. A existência de uma frota mista com veículos desde micro-ônibus até biarticulados é uma realidade em diversas cidades. Sugere-se também a avaliação de outros tipos de heurísticas de busca para encontrar melhores soluções de equilíbrio com a avaliação de algoritmos como NSGA-II. Inclusive a adição de funções objetivo, como o percentual da demanda não-atendida, o número médio de transferências ou a extensão média das linhas.

Adicionalmente, sugere-se a incorporação da lotação dos veículos na avaliação do custo generalizado, a variabilidade dos tempos de viagem na avaliação dos indicadores da rede e utilização da métrica de acessibilidade a empregos na avaliação das soluções, com base em trabalho já em desenvolvimento pelo autor (ARBEX; CUNHA, 2020).

Por fim, este campo de estudo traz muitas oportunidades de pesquisa para aprimorar os métodos atualmente utilizados para o projeto de redes de transporte público de forma a aumentar a eficiência dos serviços e atrair novos usuários. Nesse sentido, esta pesquisa contribuiu para que os sistemas de transporte público possam ser mais eficientes e que promovam uma mobilidade mais sustentável para as próximas gerações.

8 REFERÊNCIAS

ABEDIN, Z. U. **A Methodology to Design Multimodal Public Transit Networks : Procedures and Applications**. 2019. Technische Universität München, 2019.

AFANDIZADEH, S.; KHAKSAR, H.; KALANTARI, N. Bus Fleet Optimization Using Genetic Algorithm a Case Study of Mashhad. **International Journal of Civil Engineering**, v. 11, n. 1, p. 43–52, 2013.

AHMED, L. et al. Optimising Bus Routes with Fixed Terminal Nodes: Comparing Hyper-Heuristics with NSGAI on Realistic Transportation Networks. **Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference**, n. node 4, p. 1102–1110, 2019. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/3321707.3321867>>.

AHMED, L.; MUMFORD, C.; KHEIRI, A. Solving Urban Transit Route Design Problem Using Selection Hyper-Heuristics. **European Journal of Operational Research**, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377221718308750>>.

ALLEN, H. Bus Reform in Seoul , Republic of Korea. p. 1–21, 2013. Disponível em: <http://unhabitat.org/wp-content/uploads/2013/06/GRHS.2013.Case_.Study_.Seoul_.Korea_.pdf>.

ALSGER, A. et al. Validating and Improving Public Transport Origin-Destination Estimation Algorithm Using Smart Card Fare Data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 68, p. 490–506, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2016.05.004>>.

AMIRIPOUR, S. M. M.; CEDER, A. (Avi); MOHAYMANY, A. S. Hybrid Method for Bus Network Design with High Seasonal Demand Variation. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 1974, p. 04014015, 2014a. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000669](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000669)>.

AMIRIPOUR, S. M. M.; CEDER, A. A.; MOHAYMANY, A. S. Designing Large-Scale Bus Network with Seasonal Variations of Demand. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 48, p. 322–338, 2014b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.08.017>>.

AMIRIPOUR, S. M.; MOHAYMANY, A. S.; CEDER, A. (Avi). Optimal Modification of Urban Bus Network Routes Using a Genetic Algorithm. **Journal of Transportation**

Engineering, v. 141, n. 3, p. 04014081, Mar. 2015.

ANTP. Redução Das Deseconomias Urbanas Com a Melhoria Do Transporte Público. **Revista dos Transportes Públicos - ANTP**, v. 21, n. 1, p. 35–92, 1999. Disponível em: <http://www.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/057A84C9-76D1-4BEC-9837-7E0B0AEAF5CE.pdf>.

ANTP. **Mobilidade humana para um Brasil urbano**. [s.l.] ANTP, 2017.

ANTRIM, A.; BARBEAU, S. J.; OTHERS. The Many Uses of GTFS Data - Opening the Door Transit and Multimodal Application. **Location-Aware Information Systems Laboratory at the University of South Florida**, p. 1–24, 2013.

ARBEX, R. **Transit Network Design Instance (São Paulo Late Night) (Dataset)**, 2020. Disponível em: <<https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.15146/R3239M>>.

ARBEX, R.; CUNHA, C. B. da. Estimating the Influence of Crowding and Travel Time Variability on Accessibility to Jobs in a Large Public Transport Network Using Smart Card Big Data (Aceito Para Publicação Em 16/02/2020). **Journal of Transport Geography**, 2020.

ARBEX, R.; DA CUNHA, C. B.; SPEICYS, R. Before-and-after Evaluation of a Bus Network Improvement Using Performance Indicators from Historical Smart Card Data. **Public Transport**, 22 Oct. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12469-019-00214-z>>.

ARBEX, R. O. **Projeto de redes otimizadas de transporte público por ônibus utilizando algoritmo genético**. 2014. Universidade de São Paulo, 2014. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-16112015-160850/pt-br.php>>.

ARBEX, R. O.; ALVES, B. B.; GIANNOTTI, M. A. Comparing Accessibility in Urban Slums using Smart Card and Bus GPS Data. In: TRB 95th Annual Meeting Compendium of Papers, Washington, D.C. **Anais...** Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2016. Disponível em: <<https://trid.trb.org/view/1394074>>.

ARBEX, R. O.; DA CUNHA, C. B. Efficient Transit Network Design and Frequencies Setting Multi-Objective Optimization by Alternating Objective Genetic Algorithm. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 81, p. 355–376, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2015.06.014>>.

ARBEX, R. O.; DA CUNHA, C. B. Estimação Da Matriz Origem-Destino e Da Distribuição Espacial Da Lotação Em Um Sistema de Transporte Sobre Trilhos a Partir de

Dados de Bilhetagem Eletrônica. **Transportes**, v. 25, n. 3, p. 166–179, 2017. Disponível em: <<https://www.revistatransportes.org.br/anpet/article/view/1347>>.

AUCKLAND TRANSPORT. **Auckland Transport. New Network for the central suburbs**. Disponível em: <<https://at.govt.nz/projects-roadworks/new-public-transport-network/new-network-for-the-central-suburbs/>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

AURENHAMMER, F. Voronoi Diagrams — A Survey of a Fundamental Data Structure. **ACM Computing Surveys**, v. 23, n. 3, p. 345–405, 1991. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=116873.116880>>.

BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design. **Journal of Advanced Transportation**, v. 25, n. 2, p. 187–209, Mar. 1991. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/atr.5670250205>>.

BADIA, H.; ESTRADA, M.; ROBUSTÉ, F. Competitive Transit Network Design in Cities with Radial Street Patterns. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 59, p. 161–181, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2013.11.006>>.

BAGCHI, M.; WHITE, P. R. The Potential of Public Transport Smart Card Data. **Transport Policy**, v. 12, n. 5, p. 464–474, 2005.

BAGLOEE, S. A.; CEDER, A. A. Transit-Network Design Methodology for Actual-Size Road Networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 10, p. 1787–1804, 2011.

BARRY, J. et al. Origin and Destination Estimation in New York City with Automated Fare System Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1817, p. 183–187, Jan. 2002. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/1817-24>>.

BEIRÃO, G.; SARSFIELD CABRAL, J. A. Understanding Attitudes towards Public Transport and Private Car: A Qualitative Study. **Transport Policy**, v. 14, n. 6, p. 478–489, 2007.

BELTRÁN, P. et al. Indirect Measurement of Level of Service Variables for the Public Transport System of Santiago Using Passive Data. In: **Transport Survey Methods: Best Practice for Decision Making**. [s.l.] Emerald Group Publishing Limited, 2013. p. 673–694.

BOISJOLY, G.; EL-GENEIDY, A. Daily Fluctuations in Transit and Job Availability: A Comparative Assessment of Time-Sensitive Accessibility Measures. **Journal of Transport**

Geography, v. 52, p. 73–81, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.03.004>>.

BOK, J.; KWON, Y. Comparable Measures of Accessibility to Public Transport Using the General Transit Feed Specification. **Sustainability (Switzerland)**, v. 8, n. 3, 2016.

BRIAND, A.-S. et al. Analyzing Year-to-Year Changes in Public Transport Passenger Behaviour Using Smart Card Data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 79, p. 274–289, 2017. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X17301055>>.

BUBA, A. T.; LEE, L. S. A Differential Evolution for Simultaneous Transit Network Design and Frequency Setting Problem. **Expert Systems with Applications**, v. 106, p. 277–289, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.04.011>>.

CATALA, M.; DOWNING, S.; HAYWARD, D. Expanding the Google Transit Feed Specification to Support Operations and Planning. p. 1–64, 2011. Disponível em: <<http://www.worldtransitresearch.info/research/4067/>>.

CEDER, A. **Public Transit Planning and Operation: Modeling, Practice and Behavior**. 2nd. ed. [s.l.] CRC Press, 2015.

CEDER, A.; WILSON, N. H. M. Bus Network Design. **Transportation Research Part B**, v. 20, n. 4, p. 331–344, 1986.

CERVERO, R.; DAI, D. BRT TOD : Leveraging Transit Oriented Development with Bus Rapid Transit Investments. **Transport Policy**, v. 36, p. 127–138, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.08.001>>.

CHAI, S.; LIANG, Q. An Improved NSGA-II Algorithm for Transit Network Design and Frequency Setting Problem. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2020, p. 1–20, 16 Jan. 2020. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/jat/2020/2895320/>>.

CHAKROBORTY, P. Genetic Algorithms for Optimal Urban Transit Network Design. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 18, p. 184–200, 2003.

CHAKROBORTY, P.; WIVEDI, T. Optimal Route Network Design for Transit Systems Using Genetic Algorithms. **Engineering Optimization**, v. 34, n. 1, p. 83–100, Jan. 2002. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/03052150210909>>.

CHEW, J. S. C.; LEE, L. S. A Genetic Algorithm for Urban Transit Routing Problem.

International Journal of Modern Physics: Conference Series, v. 09, p. 411–421, 2012.
Disponível em: <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S2010194512005491>>.

CHEW, J. S. C.; LEE, L. S.; SEOW, H. V. Genetic Algorithm for Biobjective Urban Transit Routing Problem. **Journal of Applied Mathematics**, v. 2013, 2013.

CHRIQUI, C.; ROBILLARD, P. Common Bus Lines. **Transportation Science**, v. 9, n. 2, p. 115, 1975. Disponível em: <<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=4465906&site=ehost-live>>.

CHU, K. K. A.; CHAPLEAU, R. Augmenting Transit Trip Characterization and Travel Behavior Comprehension. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2183, n. 1, p. 29–40, 2011.

CIPRIANI, E. A Multimodal Transit Network Design Procedure for Urban Areas. v. 10, n. May, p. 2006, 2006.

CIPRIANI, E.; GORI, S.; PETRELLI, M. Transit Network Design: A Procedure and an Application to a Large Urban Area. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 20, n. 1, p. 3–14, 2012.

CITILABS. **CUBE TRANSPORTATION & LAND-USE MODELING**. Disponível em: <<http://www.citilabs.com/software/cube/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

COMPANY, O. B. **Oxford Bus Company. Network and city centre maps**. Disponível em: <<https://www.oxfordbus.co.uk/maps/>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

DAGANZO, C. F. Structure of Competitive Transit Networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 44, n. 4, p. 434–446, 2010.

DE CEA, J.; FERNANDEZ, E. Transit Assignment for Congested Public Transport Systems: An Equilibrium Model. **Transportation Science**, v. 27, n. December 2015, p. 133–147, 1993.

DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, 2002.

DENATRAN. **Frota de Veículos no Brasil. Departamento Nacional de Trânsito, Ministério das Cidades**. Disponível em: <www.denatran.gov.br/estatistica/237-frota-veiculos>. Acesso em: 15 mar. 2019.

DENG, T.; MA, M.; WANG, J. Evaluation of Bus Rapid Transit Implementation in China: Current Performance and Progress. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 139, n. 3, p. 226–234, 2013.

DENG, T.; NELSON, J. D. Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature. **Transport Reviews**, v. 31, n. 1, p. 69–96, 2011.

DIJKSTRA, E. W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs. **Numerische Mathematik**, v. 1, n. 1, p. 269–271, Dec. 1959. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/BF01386390>>.

ESTRADA, M. et al. Design and Implementation of Efficient Transit Networks: Procedure, Case Study and Validity Test. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 45, n. 9, p. 935–950, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2011.04.006>>.

FAN, L.; MUMFORD, C. L.; EVANS, D. A Simple Multi-Objective Optimization Algorithm for the Urban Transit Routing Problem. **2009 IEEE Congress on Evolutionary Computation**, p. 1–7, 2009. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4982923>>.

FAN, W.; MACHEMEHL, R. B. Optimal Transit Route Network Design Problem with Variable Transit Demand: Genetic Algorithm Approach. **Journal of Transportation Engineering**, v. 132, n. January, p. 40–51, 2006.

FARAHANI, R. Z. et al. A Review of Urban Transportation Network Design Problems. **European Journal of Operational Research**, v. 229, n. 2, p. 281–302, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.01.001>>.

FARBER, S.; FU, L. Dynamic Public Transit Accessibility Using Travel Time Cubes: Comparing the Effects of Infrastructure (Dis)Investments over Time. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 62, p. 30–40, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2016.10.005>>.

FARZIN, J. M. Constructing an Automated Bus Origin-Destination Matrix Using Farecard and Global Positioning System Data in São Paulo, Brazil. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2072, n. 1, p. 30–37, 2008.

FERRAZ, A. C. P.; TORRES, I. G. E. **Transporte Público Urbano**. 2. ed. [s.l.] RiMa Editora, 2004.

GOOGLE. **Google Transit - O que é GTFS?** Disponível em: <<https://developers.google.com/transit/gtfs/?hl=pt-br>>. Acesso em: 3 apr. 2019.

GORDON, J. et al. Automated Inference of Linked Transit Journeys in London Using Fare-Transaction and Vehicle Location Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2343, p. 17–24, Dec. 2013. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2343-03>>.

GOULET LANGLOIS, G.; KOUTSOPOULOS, H. N.; ZHAO, J. Inferring Patterns in the Multi-Week Activity Sequences of Public Transport Users. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 64, p. 1–16, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2015.12.012>>.

GUERRA, L.; BARBOSA, H. M.; KELLI, L. Estimativa de Matriz Origem/Destino Utilizando Dados Do Sistema de Bilhetagem Eletrônica: Proposta Metodológica. **Transportes**, v. 22, n. 3, p. 26–38, 2014.

GUIHAIRE, V.; HAO, J.-K. Transit Network Design and Scheduling: A Global Review. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 42, n. 10, p. 1251–1273, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965856408000888>>.

HAMDOUCH, Y. et al. Schedule-Based Transit Assignment Model with Vehicle Capacity and Seat Availability. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 10, p. 1805–1830, 2011.

HEYKEN SOARES, P. et al. An Adaptive Scaled Network for Public Transport Route Optimisation. **Public Transport**, v. 11, n. 2, p. 379–412, 29 Aug. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s12469-019-00208-x>>.

HILDEBRAND, C.; HÖRTIN, S. **A comparative study between Emme and Visum with respect to public transport assignment**. 2014. Linköping University, The Institute of Technology, 2014.

HÖRCHER, D.; GRAHAM, D. J.; ANDERSON, R. J. Crowding Cost Estimation with Large Scale Smart Card and Vehicle Location Data. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 95, p. 105–125, 2017. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0191261516303551>>.

HUANG, D. et al. Multimodal Transit Network Design in a Hub-and-Spoke Network Framework. **Transportmetrica A: Transport Science**, v. 14, n. 8, p. 706–735, 2018.

IBARRA-ROJAS, O. J. et al. Planning, Operation, and Control of Bus Transport Systems: A Literature Review. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 77, p. 38–75, 2015.

INRO. **EMME Modeller Manual Volume 2**, 2017. .

INRO. **EMME Multimodal Transport Planning Software**. Disponível em: <<https://www.inrosoftware.com/en/products/emme/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

IRELAND, G. of. **Bus Connects. Dublin Area Revised Bus Network**. Disponível em: <busconnects.ie/initiatives/dublin-area-bus-network-redesign/>. Acesso em: 31 oct. 2019.

ISLAM, K. A. et al. A Heuristic Aided Stochastic Beam Search Algorithm for Solving the Transit Network Design Problem. **Swarm and Evolutionary Computation**, 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210650218302414>>.

JANG, W. Travel Time and Transfer Analysis Using Transit Smart Card Data. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2144, p. 142–149, 2010. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2144-16>>.

JHA, S. B.; JHA, J. K.; TIWARI, M. K. A Multi-Objective Meta-Heuristic Approach for Transit Network Design and Frequency Setting Problem in a Bus Transit System. **Applied Soft Computing**, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.02.025>>.

JIRÓN, P. Technology and Technicians Out of Control: The implementation of Transantiago from a daily mobility point of view. In: **Technologies of Mobility in the Americas, Intersections in Communications and Culture: Global Approaches and Transdisciplinary Perspectives**. [s.l.] Peter Lang Publishing, 2012. 29.

KEE, K. et al. Travel Demand Characterization for a Large Urban Transit Infrastructure Using Smart Card. **13th WCTR**, p. 1–14, 2013.

KEPAPTSOGLU, K.; KARLAFTIS, M. Transit Route Network Design Problem: Review. **Journal of Transportation Engineering**, v. 135, n. 8, p. 491–505, 2009.

KILIÇ, F.; GÖK, M. A Demand Based Route Generation Algorithm for Public Transit Network Design. **Computers and Operations Research**, v. 51, p. 21–29, 2014.

KIM, K. M. et al. Does Crowding Affect the Path Choice of Metro Passengers? **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 77, p. 292–304, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2015.04.023>>.

KITTELSON & ASSOCIATES. **Transit Capacity and Quality of Service Manual, Third Edition**. 3rd. ed. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2013.

KOREA TRANSPORT INSTITUTE. **Public Transport Reform of Seoul**. Disponível em: <<http://citynet-ap.org/wp-content/uploads/2015/07/Lecture-4-Public-Transportation-Reform.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2019.

KUMAR, P.; KHANI, A.; HE, Q. A Robust Estimation of Transit Passenger Trajectories Using Automated Data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. under revi, n. August, p. 731–747, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.006>>.

KURAUCHI, F.; BELL, M. G. H.; SCHMÖCKER, J. D. Capacity Constrained Transit Assignment with Common Lines. **Journal of Mathematical Modelling and Algorithms**, v. 2, n. 4, p. 309–327, 2003.

KURAUCHI, F.; SCHMÖCKER, J.-D. **Public Transport Planning with Smart Card Data**. [s.l.] CRC Press, 2016.

KYKUTA, D. H. **Comparação de algoritmos para o Problema dos K Menores Caminhos**. 2018. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/45/45134/tde-20032018-003225/>>.

LAM, W. H. K. et al. A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for Congested Transit Networks. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 33, n. 5, p. 351–368, 1999.

LAMPKIN, W.; SAALMANS, P. D. The Design of Routes, Service Frequencies, and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study. **Journal of the Operational Research Society**, v. 18, n. 4, p. 375–397, 1967.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. 3a. ed. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2012.

MA, X. et al. Mining Smart Card Data for Transit Riders' Travel Patterns. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 36, p. 1–12, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2013.07.010>>.

MA, X.; WANG, Y. Development of a Data-Driven Platform for Transit Performance Measures Using Smart Card and GPS Data. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 12, p. 1–12, 2014.

MACIEL, M. S. D. **Externalidades negativas do transporte motorizado individual em zonas urbanas do Brasil: uma análise do potencial de economia de recursos para 2020**. 2012. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

MANDL, C. E. **Applied Network Optimization**. [s.l.] Academic Press, 1979.

MAUTTONE, A. **Optimizacion de recorridos y frecuencias en sistemas de transporte publico urbano colectivo**. 2005. Universidad de La República, 2005.

MISTRETTA, M. et al. Best Practices in Transit Service Planning. **Report No. 21177772000**, n. March, p. 118, 2009. Disponível em: <<http://www.nctr.usf.edu/pdf/77720.pdf>>.

MORENCY, C.; TRÉPANIER, M.; AGARD, B. Measuring Transit Use Variability with Smart-Card Data. **Transport Policy**, v. 14, n. 3, p. 193–203, 2007.

MUMFORD, C. L. New Heuristic and Evolutionary Operators for the Multi-Objective Urban Transit Routing Problem. **2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC 2013**, p. 939–946, 2013.

MUNIZAGA, M. et al. Validating Travel Behavior Estimated from Smartcard Data. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 44, p. 70–79, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.03.008>>.

MUNIZAGA, M.; PALMA, C. Estimation of a Disaggregate Multimodal Public Transport Origin-Destination Matrix from Passive Smartcard Data from Santiago, Chile. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 24, p. 9–18, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2012.01.007>>.

MUÑOZ, J. C.; GIESEN, R. Optimization of Public Transportation Systems. In: **Wiley Encyclopedia of Operations Research and Management Science**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. p. 1–10.

NACTO. **Metro Bus Network Redesign Houston**. Disponível em: <<https://nacto.org/case-study/metro-bus-network-redesign-houston/>>. Acesso em: 31 oct. 2019.

NASSIR, N. et al. Transit Stop-Level Origin–Destination Estimation through Use of Transit Schedule and Automated Data Collection System. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2263, n. 1, p. 140–150, Jan. 2011. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.3141/2263-16>>.

NASSIR, N.; HICKMAN, M.; MA, Z. L. Activity Detection and Transfer Identification for Public Transit Fare Card Data. **Transportation**, v. 42, n. 4, p. 683–705, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11116-015-9601-6>>.

NAYEEM, M. A.; ISLAM, M. M.; YAO, X. Solving Transit Network Design Problem Using Many-Objective Evolutionary Approach. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 20, n. 10, p. 3952–3963, Oct. 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8577033/>>.

OLIVEIRA, G. T. de. **Caracterização da Demanda de Sistemas de Transporte Público a partir de Dados de Sistemas de Bilhetagem Eletrônica: um Ensaio sobre Três Aspectos – Tempo, Comportamento e Espaço**. 2016. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

ORTEGA-TONG, M. A. **Classification of London's public transport users using smart card data**. 2013. Massachusetts Institute of Technology, 2013.

ORTÚZAR, J. de D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011.

OSM. **OpenStreetMap**. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/>>. Acesso em: 3 fev. 2020.

OTP (OPENTRIPPLANNER). **OpenTripPlanner - Multimodal Trip Planning**. Disponível em: <<http://www.opentripplanner.org/>>. Acesso em: 12 apr. 2019.

OWAIS, M.; OSMAN, M. K. Complete Hierarchical Multi-Objective Genetic Algorithm for Transit Network Design Problem. **Expert Systems with Applications**, v. 114, p. 143–154, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.07.033>>.

PARK, J.; KIM, D.-J.; LIM, Y. Use of Smart Card Data to Define Public Transit Use in Seoul, South Korea. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2063, p. 3–9, Dec. 2008. Disponível em: <<http://trrjournalonline.trb.org/doi/10.3141/2063-01>>.

PATTNAIK, S. B.; MOHAN, S.; TOM, V. M. Urban Bus Transit Route Network Design Using Genetic Algorithm. **Journal of Transportation Engineering**, v. 124, n. 4, p. 368–375, Jul. 1998. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-947X%281998%29124%3A4%28368%29>>.

PELLETIER, M.-P.; TRÉPANIER, M.; MORENCY, C. Smart Card Data Use in Public

Transit: A Literature Review. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, n. 4, p. 557–568, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2010.12.003>>.

PMSP. **VEIO: Viário Estrutural de Interesse do Ônibus**. Disponível em: <<http://legislacao.prefeitura.sp.gov.br/wp-content/uploads/2016/05/56834-90.pdf>>. Acesso em: 10 aug. 2017a.

PMSP. **Ônibus da madrugada transportaram quase 5 milhões de passageiros em seis meses**. Disponível em: <<http://www.capital.sp.gov.br/noticia/onibus-da-madrugada-transportaram-quase-5-milhoes>>.

POORZAHEDY, H.; SAFARI, F. An Ant System Application to the Bus Network Design Problem: An Algorithm and a Case Study. **Public Transport**, v. 3, n. 2, p. 165–187, 2011.

PTV. **PTV Visum**. Disponível em: <<http://vision-traffic.ptvgroup.com/en-us/products/ptv-visum/>>. Acesso em: 22 mar. 2019.

ROBINSON, S. et al. Methods for Pre-Processing Smartcard Data to Improve Data Quality. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 49, p. 43–58, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.10.006>>.

SALTELLI, A. et al. **Sensitivity Analysis in Practice**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2002.

SANDOVAL, E. E.; HIDALGO, D. TransMilenio: A High Capacity - Low Cost Bus Rapid Transit System Developed for Bogotá, Colombia. In: Urban Public Transportation System, Reston, VA. **Anais...** Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 28 Sep. 2004. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/40717%28148%294>>.

SCHMÖCKER, J. D. et al. Frequency-Based Transit Assignment Considering Seat Capacities. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 45, n. 2, p. 392–408, 2011.

SEABORN, C.; ATTANUCCI, J.; WILSON, N. H. M. Using Smart Card Fare Payment Data To Analyze Multi-Modal Public Transport Journeys in London. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board** **2121.-1**, n. 2121, p. 55–62, 2009.

SNYDER, L. V. Facility Location under Uncertainty: A Review. **IIE Transactions (Institute of Industrial Engineers)**, v. 38, n. 7, p. 547–564, 2006.

SPIESS, H.; FLORIAN, M. Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit

Networks. **Transportation Research Part B**, v. 23, n. 2, p. 83–102, 1989.

SPTRANS. **Noturno. Rede de Ônibus da Madrugada**. Disponível em: <<http://www.sptrans.com.br/noturno/>>. Acesso em: 10 aug. 2017.

SZETO, W. Y.; WU, Y. A Simultaneous Bus Route Design and Frequency Setting Problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. **European Journal of Operational Research**, v. 209, n. 2, p. 141–155, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.08.020>>.

TALBI, E. G. **Metaheuristics: From Design to Implementation**. [s.l.: s.n.]

TARAJO BUBA, A.; SOON LEE, L. Differential Evolution with Improved Sub-Route Reversal Repair Mechanism for Multiobjective Urban Transit Routing Problem. **Numerical Algebra, Control & Optimization**, v. 8, n. 3, p. 361–386, 2018. Disponível em: <<http://aims sciences.org//article/doi/10.3934/naco.2018023>>.

TMB. **Nova xarxa de bus: What it is and the completed bus network**. Disponível em: <<https://www.tmb.cat/en/about-tmb/transport-network-improvements/new-bus-network/evolution>>. Acesso em: 21 mar. 2019a.

TMB. **Barcelona Bus Map**. Disponível em: <<https://www.tmb.cat/en/about-tmb/get-to-know-us/about-us>>. Acesso em: 26 mar. 2019b.

TOM, V. M.; MOHAN, S. Transit Route Network Design Using Frequency Coded Genetic Algorithm. **Journal of Transportation Engineering**, v. 129, n. 2, p. 186–195, Mar. 2003. Disponível em: <[http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-3801%282004%2918%3A3%28248%29%5Cnpapers3://publication/doi/10.1061/\(ASCE\)0887-3801\(2004\)18:3\(248\)](http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-3801%282004%2918%3A3%28248%29%5Cnpapers3://publication/doi/10.1061/(ASCE)0887-3801(2004)18:3(248))>.

TRÉPANIÉ, M.; MORENCY, C.; AGARD, B. Calculation of Transit Performance Measures Using Smartcard Data. **Journal of Public Transportation**, v. 12, n. 1, p. 79–96, Mar. 2009. Disponível em: <<http://scholarcommons.usf.edu/jpt/vol12/iss1/5/>>.

TRÉPANIÉ, M.; TRANCHANT, N.; CHAPLEAU, R. Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System. **Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations**, v. 11, n. 1, p. 1–14, 2007. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15472450601122256>>.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit: Operations, Planning and Economics**. [s.l.] Wiley, 2005.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit Systems and Technology**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

WANG, W.; ATTANUCCI, J.; WILSON, N. Bus Passenger Origin-Destination Estimation and Related Analyses Using Automated Data Collection Systems. **Journal of Public Transportation**, v. 14, n. 4, p. 131–150, Dec. 2011. Disponível em: <<http://scholarcommons.usf.edu/jpt/vol14/iss4/7/>>.

WARDMAN, M. A Review of British Evidence on Time and Service Quality Valuations. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 37, n. 2–3, p. 107–128, 2001.

WARDMAN, M. Public Transport Values of Time. **Transport Policy**, v. 11, n. 4, p. 363–377, 2004.

WIDENER, M. J. et al. How Do Changes in the Daily Food and Transportation Environments Affect Grocery Store Accessibility? **Applied Geography**, v. 83, p. 46–62, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.03.018>>.

YEN, J. Y. Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network. **Management Science**, v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.

ZAIN UL ABEDIN et al. A hierarchical public transit network design method for large networks. In: Proceedings of the Transportation Research Board (TRB) 97th Annual Meeting, August 2017, Washington, D.C. **Anais...** Washington, D.C.: 2018.

ZHAO, H.; XU, W.; JIANG, R. The Memetic Algorithm for the Optimization of Urban Transit Network. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 7, p. 3760–3773, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.056>>.

ZHAO, J. **The planning and analysis implications of automated data collection systems : rail transit OD matrix inference and path choice modeling examples**. 2004. Massachusetts Institute of Technology, 2004.

ZHONG, C. et al. Measuring Variability of Mobility Patterns from Multiday Smart-Card Data. **Journal of Computational Science**, v. 9, p. 125–130, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877750315000599>>.

APÊNDICE A REVISÃO CRONOLÓGICA DA LITERATURA

O primeiro algoritmo heurístico para resolver o problema de TNDP foi proposto por Lampkin e Saalmans (1967). Na primeira etapa da metodologia proposta, uma rota inicial esqueleto (tronco) era produzida; em seguida, um a um outros nós eram adicionados na rota esqueleto até que se chegasse a uma rota completa; posteriormente, as demandas atendidas por essa rota eram eliminadas da matriz de demanda a ser atendida. Finalmente, as frequências eram então atribuídas ao conjunto de rotas geradas. Os autores aplicaram a metodologia em uma pequena cidade inglesa. Além da metodologia, os autores apresentam propriedades do que seria uma “boa” rede: a) máximo de viagens diretas; b) rotas devem ser razoavelmente diretas e sem meandros; c) as rotas devem se encontrar para facilitar transferências e d) não devem existir muitas rotas na rede.

Mandl (1979) desenvolveu uma abordagem de dois estágios: primeiro, um conjunto viável de rotas foi criado ligando pontos terminais; então, heurísticas eram aplicadas para incrementar a qualidade do conjunto inicial de rotas. Apenas custos de viagem dentro do veículo foram consideradas para avaliar a qualidade das rotas. No trabalho pioneiro de Mandl uma instância benchmark da rede de 15 cidades suíças foi proposta, a qual tem sido usada extensivamente para comparação de resultados.

Baaj e Mahmassani (1991) propuseram um algoritmo baseado em três componentes principais: um algoritmo de geração de rotas (RGA), um procedimento de análise denominado TRUST para cálculo de estatísticas da rede, um analista de rotas e um algoritmo de melhorias de rotas. A solução proposta combinava o conhecimento e a experiência do planejador de rede para reduzir o espaço de busca e apresentava técnicas de busca de soluções usando ferramentas de inteligência artificial. Baaj e Mahmassani (1995) apresentam um algoritmo híbrido de geração de rotas para o problema.

Ceder e Israeli (1998) propuseram um modelo de programação mista não-linear que leva em consideração tanto custos de passageiros como de operadores. Na primeira etapa, um conjunto grande de rotas viáveis conectando todos os nós é gerada; então um problema de cobertura (set covering problem) é resolvido para achar subconjuntos mínimos de rotas aos quais é aplicada uma análise multiobjetivo para encontrar o subconjunto mais adequado.

Pattnaik *et al.* (1998) propuseram um algoritmo de duas fases para resolver o problema de definir a rede de ônibus; na primeira fase um conjunto de rotas é gerado; na segunda fase um

algoritmo genético é aplicado para determinar qual o melhor conjunto de rotas que minimiza o custo total do sistema. O diferencial do trabalho é que os autores propõem uma codificação da solução no algoritmo genético que busca o número de rotas ideal e quais rotas simultaneamente. O algoritmo foi aplicado à rede de transporte em Madras, Índia, com 25 nós e 39 links.

Chakroborty e Dwivedi (2002) descreveram propriedades de uma rede de rotas eficiente e propuseram um processo iterativo de três etapas para o problema. Dessas propriedades, destacam-se: a) a rede deve satisfazer a maior parte, se não toda demanda; b) deve satisfazer a demanda sem exigir transferências e c) deve oferecer tempos de viagem totais baixos. Das etapas da metodologia proposta pelos autores: primeiro, vários conjuntos de rotas razoáveis para uma dada rede viária e matriz de demanda são determinadas. Segundo, a qualidade de uma rede (conjunto de rotas) como um todo é determinada na etapa de avaliação. Terceiro, a rede é modificada usando um procedimento de modificação proposto. Em um trabalho posterior, Chakroborty (2003) considera tanto o projeto das rotas como a programação horária, aplicando o método à rede de benchmark de Mandl (MANDL, 1979).

Tom e Mohan (2003) seguiram a estrutura de método básica de Pattnaik *et al.* (1998) e propuseram a minimização do custo total do sistema, incluindo custos operacionais de ônibus e tempo total de viagem dos passageiros, usando um processo de solução de duas fases. Primeiro, um grande conjunto de rotas candidatas é gerado usando um algoritmo de geração de rotas candidatas. Um conjunto de rotas para compor a solução é então selecionado das candidatas usando um algoritmo genético, considerando frequência da rota como uma variável. Os autores estudam o efeito do tamanho da população e da probabilidade de cruzamento e mutação do algoritmo genético. O modelo é aplicado à rede de tamanho médio de Chennai, Índia, com 75 nós e 125 links.

Ngamchai e Lovell (2003) propuseram sete operadores de algoritmo genético especificamente para a parte de melhoria de rotas de seu algoritmo proposto para facilitar a busca, incluindo rota-fundir (*route-merge*), rota-quebrar (*route-break*), rota-broto (*route-sprout*), adicionar-link (*add-link*), remover-link (*remove-link*), rota-cruzamento (*route-crossover*) e um último que tratava da questão da localização da transferência (*transfer-location*). Os autores também aplicaram coordenação de *headway* ordenando demandas por transferência em terminais. A metodologia é aplicada em uma instância teste de 25 nós.

Lee e Vuchic (2005) consideraram o problema de PRTP no caso de demanda variável, ou seja, a demanda por transporte público depende da configuração da rede e das frequências das rotas a partir de uma demanda total fixa já dada. No método dos autores, um modelo de divisão

modal é utilizado na metodologia para gerar a rede ótima e estimar a demanda por transporte público simultaneamente. Fan e Machemehl (2006) propuseram um método baseado em algoritmo genético que também lida com uma demanda variável, usando um método de solução de três componentes principais: um procedimento de geração de um conjunto de rotas candidatas, um procedimento de análise de rede e por último o algoritmo genético para combinar as duas primeiras partes.

Fan *et al.* (2009) propuseram um algoritmo de otimização multiobjetivo evolucionário para resolver o PRTP, buscando minimizar tanto custos de passageiros como de operadores. O algoritmo se baseia no procedimento cria-pequena-mudança (*make-small-change*), que faz uma pequena modificação na rede para produzir um novo conjunto de rotas viáveis, baseado em simples movimentos de vizinhança: adicionando um nó ao final de uma rota ou removendo um nó no início de uma rota. Fan e Mumford (2010) desenvolveram um framework meta-heurístico para resolver o PRTP, consistindo num esquema de representação, um procedimento de inicialização e um conjunto simples de movimentos de vizinhança. O método das autoras melhora resultados publicados anteriormente para a instância de benchmark de Mandl (Mandl, 1979), tendo sido testada também em algumas instâncias maiores, geradas pelas próprias autoras. Mumford (2013) apresenta novos operadores genéticos específicos aplicados ao problema em um framework evolucionário multiobjetivo. Nesses trabalhos as autoras não consideram o cálculo das frequências das linhas.

Bagloee e Ceder (2011) estudaram o projeto de uma rede de rotas de transporte público para redes de tamanho real. O método também considera aspectos importantes como categorização de pontos de parada, considera veículos de diferentes capacidades, hierarquia de modos de transporte e com a capacidade de cada sistema. Primeiro, o processo começa com a construção de um conjunto de pontos de parada potenciais utilizando um conceito de clusterização. Então um conjunto de rotas candidatas é formado usando teoria da gravidade de Newton e um procedimento de caminho mínimo adaptado. Finalmente um mecanismo de busca meta-heurística baseado em algoritmo genético e colônia de formigas é aplicado às rotas candidatas até que uma boa solução seja encontrada. Os autores aplicam o método à rede benchmark de Mandl (MANDL, 1979) e à cidade de Winnipeg, Canadá.

Szeto e Wu (2011) investigaram o projeto de uma rede troncal de ônibus para uma área residencial da cidade de Hong Kong, procurando reduzir o número de transferências e o tempo total de viagem da rede. Eles aplicam um algoritmo genético específico, que procura otimizar o projeto da rede, e uma heurística de busca de vizinhança que procura otimizar a frequência

das rotas. Para ilustrar a robustez e qualidade das soluções obtidas, experimentos computacionais foram aplicados a 1000 matrizes de origem-destino perturbadas, ou seja, que tiveram seus valores multiplicados por um pequeno fator, variando os dados de entrada. Os resultados mostraram que o resultado obtido pelo método de solução proposto é robusto considerando incerteza na matriz de demanda, e o projeto era melhor que a configuração atual da rede na época da publicação do estudo.

Blum e Mathew (2011) aplicaram um sistema de otimização por agentes inteligentes ao problema do PRTP. Nesses agentes inteligentes estão incluídos módulos de criação de rotas candidatas, criação de redes com base na seleção de rotas, avaliação das redes e modificação das rotas da rede. O método destes autores resultou numa melhora significativa na rede de rotas quando aplicado à rede de Delhi, Índia.

Cipriani *et al.* (2012) descreveram um procedimento e sua aplicação ao PRTP na cidade de Roma, considerando a complexa rede viária, o sistema de transporte público multimodal, e a demanda de transporte público muitos-para-muitos. O procedimento inclui um algoritmo de geração de rotas candidatas e um algoritmo genético paralelo para achar o conjunto subótimo de rotas e suas frequências associadas, compondo uma rede. Para a geração das rotas candidatas, a demanda já atendida por linhas de serviços de trilhos é retirada. O software EMME é utilizado para a alocação da demanda. Após a aplicação na cidade de Roma os autores relataram uma melhoria da rede proposta pelo algoritmo sobre a rede existente, com redução de transferências e aumento das frequências das linhas. A pesquisa é uma extensão dos trabalhos de Cipriani *et al.* (2006) e Carrese e Gori (2002).

Chew *et al.* (2013) propuseram um método baseado em algoritmo genético para minimizar os custos de passageiros e de operadores. Os autores conduziram experimentos computacionais na rede benchmark de Mandl (1979). Não foi considerado o cálculo das frequências das linhas.

Afandizadeh *et al.* (2013) aplicaram algoritmo genético para resolver o PRTP considerando também a determinação das frequências das rotas, procedimento de alocação e de avaliação da rede. Os autores usaram uma função objetivo que também levou em consideração alocação dos veículos às garagens mais próximas, penalidade para lugares vazios para otimizar a capacidade dos veículos e uma penalidade para demanda não atendida. Os autores também consideraram uma alocação da demanda usando uma função de utilidade de tempo para quando mais de uma opção de trajeto era possível para um mesmo par de origem e destino. O modelo logit foi usado para estimar uma função utilidade ao invés do caminho mais curto na alocação

da demanda às linhas, como tinha sido a forma mais comum encontrada nos outros trabalhos até então.

A meta-heurística de otimização por colônia de abelhas (*Bee Colony Optimization*), como apresentada em Karaboga (2007), também tem sido aplicada recentemente para a solução do PRTP. Nikolić e Teodorović (2013) trabalharam no problema do PRTP baseado nesta meta-heurística de otimização de colônia de abelhas, procurando maximizar o número de passageiros atendidos, minimizar o tempo de viagem dentro do veículo para todos os passageiros e minimizar o número total de transferências na rede. Nikolić e Teodorović (2014) tratam o problema de PRTP incluindo a definição de frequências das linhas de forma simultânea, utilizando a abordagem da otimização por colônia de abelhas. Os autores utilizam uma metodologia de alocação da demanda simplificada e obtém bons resultados na instância teste de Mandl (MANDL, 1979).

A metodologia de otimização por colônia de abelhas também é usada em Szeto e Jiang (2014), que propõem um problema de PRTP de dois níveis onde o problema superior é formulado como um problema de programação inteira mista não-linear com o objetivo de minimização de transferências, e o problema inferior de alocação de passageiros com restrição de capacidade. A otimização por colônia de abelhas projeta as rotas na rede e os autores aplicam o método a uma região de Hong Kong e à cidade de Winnipeg, Canadá.

Kechagiopoulos e Beligiannis (2014) apresentaram um método baseado na meta-heurística de otimização por inteligência coletiva (*particle swarm*). Resultados experimentais aplicados na instância de Mandl (MANDL, 1979) mostraram que o método é competitivo quando comparado aos resultados dos métodos existentes na literatura até então.

Nayeem *et al.* (2014) exploraram novamente os algoritmos genéticos neste trabalho que busca otimizar a qualidade da rede para os usuários, sem levar em conta a frequência das linhas nem os custos dos operadores. Os autores propõem dois algoritmos genéticos elitistas, sendo que o segundo possui uma população variável. Outro diferencial do trabalho é que a população inicial é composta de soluções idênticas, e, no início da evolução, apenas o operador de mutação atua. Rahman *et al.* (2015) estendem a metodologia, propondo um Algoritmo Genético Elitista Guiado (*Guided Genetic Algorithm with Elitism*, GGAW). É uma proposta que mescla a busca local guiada (*Guided Local Search*) com o algoritmo genético elitista proposto na pesquisa anterior. Os autores obtêm os melhores resultados encontrado nesta revisão para a instância de Mandl considerando apenas o único objetivo de atendimento ao usuário (através de percentual

de ligações diretas e tempo médio de viagem), sem levar em conta a faceta multiobjetivo do problema e a definição das frequências.

O reprojeto da rede de ônibus de Mashhad é tema de pesquisa com diferentes abordagens (AMIRIPOUR; CEDER; MOHAYMANY, 2014a, 2014b; AMIRIPOUR; MOHAYMANY; CEDER, 2015). Em Amiripour *et al.* (2014a) e Amiripour *et al.* (2014b), os autores propõem um modelo que leva em conta a variação sazonal da demanda de passageiros ao longo do ano no projeto da rede. Amiripour *et al.* (2015) novamente focam no reprojeto de redes de transporte público, onde uma parte da rede atual é utilizada como input nos conjuntos de rotas possíveis para serem selecionadas. Os autores utilizam um algoritmo genético com quatro etapas: 1) gerar o conjunto de rotas potenciais, 2) projetar a rede, 3) verificar a viabilidade da implementação das rotas no viário e, por último, 4) examinar a extensão das rotas para melhorias. No conjunto de rotas potenciais, são considerados três tipos: as rotas já existentes na rede, rotas potenciais novas e rotas sugeridas por especialistas em transporte.

Os trabalhos de Amiripour obtêm resultados bons para a instância de Mashhad, que possui 531 nós (sendo 50 nós de início/final de linha) e 1,715 *links*, como redução de frota e da função objetivo adotada. Porém, esta rede não será usada para comparação nesta pesquisa pois não é baseada em uma estrutura de tronco-alimentação e também não pode ser divulgada para comunidade científica pelos autores.

Kiliç e Gökb (2014) apresentam um método que constrói uma rede inicial usando demanda potencial dos links com base em uma alocação tudo ou nada da demanda por transporte público na rede viária. O algoritmo é testado na instância de Mandl (MANDL, 1979) e outras redes de transporte grandes de Mumford (2013) usando os algoritmos de Subida de encosta (*Hill Climbing*) e Busca Tabu (*Tabu Search*), apresentando melhores resultados que algoritmos anteriores.

Recentemente, Zhao *et al.* (2015) desenvolveram um método para o PRTP baseado em algoritmo memético. O algoritmo memético é um algoritmo evolucionário que está crescendo em uso nos últimos anos. Ele é a composição de um algoritmo genético com operadores de busca local para aumentar a performance computacional. Os autores desenvolvem operadores de busca local: movimentos *2-opt*, de troca e de realocação. Esses movimentos se baseiam na modificação das rotas em função de trocas e alterações entre os links de duas rotas, sendo, portanto, um método de rotas modificáveis. Resultados de aplicação à instância de Mandl (MANDL, 1979) demonstraram uma boa eficiência do método.

Arbex e Cunha (2015) propõem um algoritmo genético com objetivo alternante (AOGA) para o projeto de redes de transporte público. Neste trabalho, os autores aplicam operadores de busca local para evitar a inviabilidade de soluções após a atuação dos operadores do algoritmo genético. São obtidos os melhores resultados da literatura até então para a instância de Mandl (MANDL, 1979) considerando o problema multiobjetivo de redução de custos dos operadores e atendimento ao usuário através da busca em uma análise de sensibilidade dos parâmetros do método. Os resultados são apresentados através de gráficos e painéis de visualização que facilitam a comparação entre soluções na fronteira de Pareto.

As soluções iniciais de soluções que utilizam meta-heurísticas populacionais para o PRTP têm a tendência de serem inviáveis caso não sejam adotadas as devidas precauções ao gerá-las. De modo a aumentar a qualidade da população inicial em termos de viabilidade das soluções, Buba e Lee (2016) apresentam um novo mecanismo de reparo, chamado de reparo reverso sub-roteira (*sub-route reversal repair mechanism*). Resumidamente, este mecanismo busca se em alguma das rotas da solução proposta tem um nó vizinho a algum nó não atendido nas suas extremidades, e cria uma nova rota agregando este nó. Os autores apresentam o mecanismo de reparo em um algoritmo de evolução diferencial que busca minimizar os tempos de viagem dos usuários e chegam a resultados competitivos com os da literatura.

Em pesquisa posterior, Buba e Lee (2018) propõem a utilização da meta-heurística Evolução Diferencial (*Differential Evolution*) para a determinação simultânea das rotas e das frequências com o objetivo de minimizar os custos dos usuários e a demanda não atendida, com a aplicação de um mecanismo de reparo para tratar soluções inviáveis que são geradas ao longo da aplicação dos operadores. A metodologia é aplicada à instância de Mandl.

Owais e Osman (2018) apresentam uma metodologia baseada em Algoritmos Genéticos multiobjetivos que tanto constrói as rotas como as seleciona para formar a rede, filtrando as soluções ao final da metodologia de modo a produzir um conjunto de soluções não-dominadas (fronteira de Pareto). Os autores também consideram o cálculo de frequências para a estimar os custos dos operadores e aplicam sua metodologia nas instâncias de Mandl e Rivera, Uruguai.

Ahmed *et al.* (2018) aplica hiper-heurísticas (*hyper-heuristics*) no PRTP sem cálculo de frequências. Hiper-heurísticas são técnicas de busca de propósito geral que exploram o espaço de aplicação de heurísticas de baixo nível para melhorar uma solução através de um framework iterativo (AHMED; MUMFORD; KHEIRI, 2018). As heurísticas de baixo nível aplicadas no trabalho incluem adição, remoção, substituição e trocas de nós no itinerário das linhas, assim como trocas entre linhas. Para gerar um conjunto de soluções equilibradas, Ahmed *et al.* (2018)

propõem a variação de pesos para os custos dos operadores e dos usuários na função objetivo para gerar um conjunto de soluções equilibradas, apresentando uma fronteira de Pareto. Os autores reportam bons resultados para as instâncias aplicadas, cuja maior foi Mumford3, com 127 nós e 425 *links*.

Islam *et al.* (2019) propõem uma heurística para criar boas soluções e um algoritmo chamado de Procura de Feixe Estocástico (*Stochastic Beam Search*). Este procedimento é uma técnica de busca simples que começa com um conjunto de soluções iniciais e explora o espaço de soluções usando funções sucessoras (*successor functions*), rastreando apenas a mais promissora das soluções (ISLAM *et al.*, 2019). A metodologia também trabalha com a demanda para gerar as soluções iniciais e algoritmos de k caminhos mínimos para gerar alternativas de trajeto. São reportados excelentes resultados para instâncias de Mandl e Mumford para o PRTP sem cálculo de frequências em um tempo de processamento bastante reduzido aos demais da literatura.

Jha *et al.* (2019) propõem dois estágios para resolver o PRTP com cálculo de frequências. Inicialmente o projeto da rede é feito após a geração de um conjunto de linhas candidatas com a aplicação de Algoritmos Genéticos. Em seguida, o problema de cálculo de frequências é resolvido usando Otimização de Enxame de Partículas Multiobjetivo com Várias Estratégias de Busca (*multi-objective particle swarm optimization with multiple search strategies*, MMOPSO) para gerar uma fronteira de Pareto entre tempos de viagem e custo operacional. Os autores aplicam a metodologia à instância de Mandl e comparam os resultados da aplicação da MMOPSO com o método NSGA-II (DEB *et al.*, 2002) para obtenção da fronteira de Pareto.

APÊNDICE B REVISÃO DA LITERATURA SOBRE BILHETAGEM ELETRÔNICA NO PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE PÚBLICO

Esta pesquisa utiliza dados processados de bilhetagem eletrônica e registros de posicionamento da frota por meio de equipamentos GPS (*global positioning system*) para estimar a matriz origem-destino de viagens para o PRTP. Assim, este apêndice apresenta uma revisão da literatura do uso destes dados no planejamento dos sistemas de transporte público em diferentes aplicações.

B.1 Aplicações de Dados de Bilhetagem Eletrônica

A incorporação da tecnologia da informação nos transportes públicos das cidades nos últimos anos trouxe uma oportunidade de geração automática de dados que possuem um grande potencial para a melhoria do planejamento e operação dos sistemas (BAGCHI; WHITE, 2005; PELLETIER; TRÉPANIER; MORENCY, 2011). De fato, Bagchi e White (2005) apresentam uso desses dados na análise de padrões de viagem, incluindo taxas de viagens e quantificação de transferências entre ônibus. Pelletier *et al.* (2011) apresentam uma revisão da literatura onde dividem o uso de dados de bilhetagem eletrônica em três grandes níveis: estratégico (planejamento de longo prazo), tático (para ajustes de serviço e desenvolvimento da rede de transportes) e operacional (indicadores de performance e estatísticas de quantidade de passageiros). Tanto para as análises de nível estratégico como para o tático, a estimação das origens e destinos das transações é essencial. Mais recentemente, Kurauchi e Schmoecker (2016) descrevem alguns dos usos recentes em pesquisas de dados de bilhetagem eletrônica, a saber:

- Escolha de rota/alocação de transporte público;
- Padrões de transferências;
- Carregamento da rota/veículo;
- Confiabilidade do serviço como vivenciada pelo usuário;
- Variações de uso por hora do dia, dia da semana, etc.;
- Inferência do local de residência e informação socioeconômica;
- Comparação com pesquisas de viagem para checagem;

O grande volume de dados gerado pelo fato da coleta ser contínua e passiva, permite análises inovadoras com os dados históricos. Isto abre caminho para pesquisas longitudinais,

que antes eram muito complexas com métodos tradicionais de coleta de dados. Alguns dos exemplos nesse sentido, além daqueles estudos para estimar origem-destino das transações discutidos na próxima seção, incluem: análise de padrões de viagem ao longo do tempo (MORENCY; TRÉPANIER; AGARD, 2007; PARK; KIM; LIM, 2008; CHU; CHAPLEAU, 2011; ZHONG *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2016), segmentação de usuários em grupos usando dados longitudinais (KEE *et al.*, 2013; MA *et al.*, 2013; ORTEGA-TONG, 2013; GOULET LANGLOIS; KOUTSOPOULOS; ZHAO, 2016; BRIAND *et al.*, 2017), análises de desempenho do sistema (TRÉPANIER; MORENCY; AGARD, 2009; BELTRÁN *et al.*, 2013; MA; WANG, 2014) e estudos sobre lotação (KIM *et al.*, 2015; HÖRCHER; GRAHAM; ANDERSON, 2017).

Um exemplo de estudo com grande volume de dados aparece em Jang (2010), que fez uma análise extensiva dos tempos de viagem e das transferências realizadas em Seul, na Coreia do Sul. Como o sistema de bilhetagem de Seul exige a passagem do cartão tanto no momento de embarque como no desembarque, a base de dados gerada permite análises detalhadas do sistema. O autor utilizou dados de 100 milhões de registros de uma semana para gerar um mapa de tempos de viagem e fazer uma análise detalhada dos padrões de transferência de usuários, identificando pontos críticos que necessitariam de melhorias.

Kurauchi e Schmoecker (2016) também apresentam os desafios metodológicos de se trabalhar com dados de bilhetagem eletrônica, como: qualidade dos dados, o grande volume de dados e a habilidade de processá-los, metodologias para expansão das informações, determinação da localização das transações e distorções causadas por troca ou substituição do cartão pelo usuário em pesquisas longitudinais. Esses desafios metodológicos indicam um espaço importante na literatura de análise de bilhetagem eletrônica que merece ser ressaltada.

Finalizando, esta seção demonstra que existe um grande potencial a ser explorado com os dados passivos de transporte que estão sendo gerados nas cidades. Nos últimos anos, é cada vez maior o volume de informações geradas e o número de estudos sobre esses dados vem aumentando. Na próxima seção são descritos os principais trabalhos que utilizam esses dados para a construção de matrizes origem e destino, apresentando as bases metodológicas para tal.

B.2 Construção de Matrizes Origem e Destino

Estimar as origens e destinos das transações é uma das possibilidades advindas do uso da bilhetagem eletrônica nos sistemas de transporte público no mundo. Os primeiros trabalhos

neste tópico foram de Barry *et al.* (2002) e Zhao (2004), que aplicaram uma metodologia baseada na sequência das transações para estimar as origens e destinos de viagens em sistemas de trilhos. Recentemente, o assunto tem sido alvo de diversas pesquisas (TRÉPANIER; TRANCHANT; CHAPLEAU, 2007; SEABORN; ATTANUCCI; WILSON, 2009; WANG; ATTANUCCI; WILSON, 2011; GORDON *et al.*, 2013).

A construção de matrizes OD usando essas metodologias de estimação de origem e destino das transações dos dados de bilhetagem eletrônica é assunto de diversos estudos (FARZIN, 2008; MUNIZAGA; PALMA, 2012; GUERRA; BARBOSA; KELLI, 2014; ARBEX; DA CUNHA, 2017). Para tal, é necessária a conversão dos registros de transações em viagens completas, já que as transações correspondem ao embarque e desembarque em um ônibus ou na rede de metrô e as viagens correspondem a deslocamentos entre uma origem e um destino final. Nesse sentido, é necessário diferenciar se uma nova transação é o início de uma nova viagem ou se é um segundo embarque após a realização de uma transferência no sistema. Para se chegar a uma validação e calibração das origens e destinos estimadas, merecem destaque os trabalhos de Nassir *et al.* (2015) e Alsger *et al.* (2016).

No Brasil, o trabalho de Farzin (2008) realizou uma pesquisa pioneira para estimar uma matriz OD utilizando os dados de bilhetagem eletrônica e GPS em São Paulo. Originalmente, a tecnologia de informação foi incorporada à operação do transporte na cidade de São Paulo para efeitos de remuneração e controle da operação, porém também apresenta oportunidades para planejamento (FARZIN, 2008). De acordo com a autora, é a primeira pesquisa que utiliza dados brutos de GPS para estimar o local do embarque da transação em ônibus. O método se baseia nas diretrizes de Barry *et al.* (2002) e Zhao (2004). A aplicação da metodologia é feita apenas na região noroeste de São Paulo, pois a frota completa ainda não contava com monitoramento por GPS na época da pesquisa. Os resultados já demonstraram o potencial dessa abordagem para a elaboração de matrizes OD.

Munizaga e Palma (2012) descrevem a dificuldade e o preço da realização de pesquisas origem e destino tradicionais. Assim, apresentam uma metodologia que estima a matriz OD para viagens de transporte público na cidade de Santiago, Chile, utilizando dados de bilhetagem eletrônica, GPS dos veículos e uma base georreferenciada da rede de transporte.

A metodologia utilizada por Munizaga e Palma (2012) se baseia nos trabalhos anteriores de Barry *et al.* (2002) e Zhao (2004), onde a ideia é seguir a sequência de embarques de um cartão identificando o local de desembarque olhando a posição e o tempo do próximo embarque. Isso só é possível quando ambas as transações possuem informação de localização, que é

incorporada através dos dados de rastreamento do veículos por GPS. No caso da última transação do dia, admite-se que o destino é o local mais próximo de onde a primeira viagem começou. Além disso, é necessário considerar a hipótese de que não são utilizados modos de transporte privados (carro, motocicleta, bicicleta, etc.) entre o desembarque e o embarque seguinte na sequência das transações.

Para a diferenciação se o embarque é uma transferência ou uma viagem em si, é utilizado o tempo de 30 minutos como limite na pesquisa de Munizaga e Palma (2012). Caso a diferença de tempo entre o desembarque de uma transação e o embarque em outro ônibus ou metrô seja além de 30 minutos, considera-se que foi realizada uma atividade naquele local e são contabilizadas duas viagens para a matriz OD. Em seguida, as autoras aplicam fatores de expansão para obter a matriz de viagens final, de modo a levar em conta as transações onde não foi possível estimar o local de desembarque.

Finalmente, as autoras relatam que este é um primeiro passo importante no sentido de estimar matrizes origem-destino de dados passivos de transporte, e que mais pesquisa é necessária para obter uma matriz de viagens confiável usando os dados disponíveis. Posteriormente, em Munizaga *et al.* (2014), é realizada uma validação da metodologia proposta, apresentando resultados positivos. Para tal, foram utilizados a própria base de dados do estudo, uma amostra de uma pesquisa de campo detalhada aplicada a usuários do metrô e um grupo de voluntários que concordaram em participar desse exercício de validação. Os autores mencionam que foi possível estimar o ponto de desembarque corretamente em 84,2% dos casos e estimar corretamente o segmento da viagem em 90% dos casos, dando maior credibilidade ao método proposto.

Concluindo esta seção, a análise de dados passivos dos sistemas de transporte vem a auxiliar o planejamento e a operação desses sistemas. Por serem coletados continuamente, eles podem fornecer uma resposta da demanda às mudanças no sistema em um intervalo de tempo bastante curto, permitindo ajustes rápidos. Nesta tese, estes dados são utilizados para a elaboração da matriz OD a ser atendida pela rede otimizada com base nas metodologias dos artigos apresentados nesta seção.

APÊNDICE C   PROCESSAMENTO DOS DADOS DE BILHETAGEM ELETRÔNICA PARA ESTIMAÇÃO DA MATRIZ ORIGEM- DESTINO DE VIAGENS

Este Apêndice expande e complementa a seção 5.2 que trata da estimação da matriz origem-destino de viagens para compor os dados de entrada da metodologia de resolução do P RTP. Neste processamento são utilizados dados de bilhetagem eletrônica do sistema, dados de GPS dos veículos e o cadastro da rede de transportes no formato *General Transit Feed System*, ou *GTFS* (GOOGLE, 2019) para a geração da matriz origem-destino de viagens. O GTFS é um formato que padroniza os dados da rede de transportes e tem sido utilizado por aplicativos de transporte e no planejamento (CATALA; DOWNING; HAYWARD, 2011; ANTRIM; BARBEAU; OTHERS, 2013).

As viagens correspondem a uma ou mais transações de um único cartão inteligente (*smart card*), de forma a corresponder a uma origem e um destino final de interesse do usuário. Não há, no entanto, uma caracterização se a transação é de uma nova viagem no sistema de transporte ou se o usuário já está em deslocamento e realiza uma transferência. Assim, é necessário um processamento adicional para avaliar se uma transação corresponde ao início de uma viagem nova ou à uma transferência realizada durante a viagem.

Tradicionalmente, a matriz origem-destino representa o volume de viagens entre zonas de tráfego definidas previamente, onde a zona de origem é aquela que corresponde à zona onde a viagem de fato foi iniciada. A matriz OD de viagens gerada pela metodologia descrita nesta seção é entre pontos de parada de ônibus e para um dia específico escolhido, ou seja, apresenta uma resolução espaço-temporal maior. Entretanto, a parcela de caminhada para acesso e egresso do sistema de transporte público à origem e ao destino final foram desconsideradas.

A seguir são descritas as etapas gerais para a elaboração da matriz de viagens entre pontos de parada, detalhadas nas próximas subseções:

- i. Leitura de Dados: etapa onde são lidos e armazenados em estruturas de dados as informações: registros de GPS dos veículos, registros das transações (bilhetagens), dados do sistema de transporte (GTFS), localizações das catracas fixas (operações de pré-embarque em terminais e catracas de estações do sistema metro-ferroviário);
- ii. Atribuição da localização às transações: Nesta etapa são adicionados o código da linha e o código do ponto de parada ou estação onde mais provavelmente ocorreu a

transação. Vale ressaltar que o local foi inferido para a transação, ou seja, que não necessariamente reflete de forma fidedigna o local do embarque. Ajustes são propostos para adequar essa diferença posteriormente neste trabalho;

- iii. Estimativa do local de desembarque da viagem: nesta etapa, é atribuída a todas as transações o local de desembarque estimado, assim como o código do ponto de parada ou estação estimado onde ocorreu este desembarque;
- iv. Inversão do sentido das viagens: nesta etapa os usuários que tiveram um percurso “para trás” (ou seja, se deslocaram no espaço em um sentido contrário ao sentido cadastrado no ônibus) terão os sentidos das linhas invertidos e submetidos novamente às 3 etapas anteriores;
- v. Verificação de validade da transação: verifica a consistência das transações para incluí-las ou não na análise das viagens;
- vi. Estimativa do horário de desembarque das transações: esta etapa é necessária para diferenciar transações de transferência de início de novas viagens. Para tal, é estimado o momento de desembarque para cada transação e o tempo entre o desembarque da transação e o embarque seguinte, ou seja, o tempo fora do sistema;
- vii. Encadeamento das transações para agrupá-las em viagens (*trip chaining*): agrupamento das transações para estimar as viagens utilizando a metodologia baseada no *trip chaining*, onde em função do tempo fora do sistema é atribuído uma nova viagem ou uma transferência a cada transação;
- viii. Verificação de validade das viagens: verifica a consistência das viagens estimadas;
- ix. Estimação da matriz origem-destino usando fator de expansão por cartão: expande as viagens estimadas para corresponder ao volume realizado por todos os usuários que utilizaram o sistema de transporte público da área de estudo;

C.1 Leitura de Dados

Inicialmente os dados são lidos e armazenados em estruturas de dados adequadas as informações abaixo, necessárias ao procedimento adotado neste trabalho:

- a) Registros de GPS relativos a um dia de informação. As descrições dos campos seguem:
  - i. data e hora exata que o servidor recebeu a informação do GPS;
  - ii. data e hora exata que o AVL (*automatic vehicle location*, que é o equipamento embarcado de GPS) enviou a informação ao servidor;

- iii. código da linha que o veículo opera;
  - iv. latitude da informação, com 6 casas decimais;
  - v. longitude da informação, com 6 casas decimais;
  - vi. código do equipamento de AVL do veículo (representa um veículo único).
- b) Transações (bilhetagens) do sistema de bilhetagem eletrônica. A descrição dos campos são como abaixo:
- i. dia, hora, minuto e segundo que a transação ocorreu;
  - ii. número único do bilhete do usuário (ID), permitindo o rastreamento de diversos embarques seguidos do bilhete no dia;
  - iii. tipo de cartão, podendo ser, por exemplo, bilhete único padrão, bilhete mensal, bilhete de operador (cobrador), etc.
  - iv. prefixo do veículo (ou código de catraca) onde ocorreu a transação;
  - v. número da linha em que ocorreu a transação.
- c) Sistema de transporte (GTFS): A base de dados das linhas é fornecida no formato *General Transit Feed Specification* (GTFS), que é um formato padrão muito utilizado atualmente em diversas cidades do mundo para a distribuição das informações de seus sistemas ao *Google Transit* (GOOGLE, 2019), assim como a disponibilização ao público em geral e a desenvolvedores interessados em fazer aplicações de transporte. Os principais arquivos que foram usados nesta metodologia são:
- i. trips.txt: Descreve as linhas existentes.
  - ii. stop_times.txt: Contém a sequência dos pontos de parada de cada linha indicada no arquivo trips.txt.
  - iii. stops.txt: Cadastro dos pontos de ônibus, terminais, estações de metrô e trem do sistema.
- d) Localizações de Catracas Fixas: estas informações correspondem à localização das catracas fixas que se localizam seja em estações de metrô, de trem ou em operações de pré-embarques em terminais.

C.2 Atribuição da Localização às Transações

Após a leitura dos dados necessários à análise, segue-se à etapa de atribuição da localização das transações. Para as transações em ônibus, é atribuída a localização do veículo embarcado mais próxima do momento registrado de cada transação. A implementação computacional efetiva desta lógica é percorrer cada veículo, e, para todas as transações que ocorreram naquele veículo, buscar qual seria a informação de GPS mais próxima no tempo e atribuir esta localização de GPS às transações. Computacionalmente se mostrou eficiente percorrer cada veículo e realizar esta operação através de matrizes, comparando todos os registros de GPS diários de um veículo com todas as suas bilhetagens recebidas no dia.

Após o cruzamento para obter a latitude e longitude estimada dos embarques em ônibus, é feita uma complementação para associar qual o código de parada estimado daquela transação. Para tal, é verificado qual o ponto de parada mais próximo da localização atribuída à transação. Após ambos os processamentos descritos, conforme ilustrado na Figura C.1, para cada transação em ônibus consta o código de parada do sistema onde ocorreu a validação. Este código será utilizado como embarque da transação.

Figura C.1: Ilustração do processo de estimativa do ponto de parada onde ocorreu cada transação em ônibus.

Fonte: Próprio autor.

Já para as transações que ocorrem em estações do sistema de trilhos e pré-embarques, o procedimento é mais direto. A localização da transação é na estação onde a catraca onde foi validado o bilhete está cadastrada como operante, e esse cruzamento é feito através de uma tabela auxiliar.

C.3 Estimativa do Local de Desembarque das Transações

Nesta etapa é feita a estimativa do local de desembarque de todas as transações de acordo com as hipóteses aplicadas por Barry (2002) e Munizaga e Palma (2012), mencionadas na seção B.2. As hipóteses são as descritas abaixo:

- a) o local do desembarque de cada transação ocorre nas proximidades da localização estimada do embarque da transação seguinte;
- b) o local de desembarque da última transação do dia ocorre nas proximidades do local de transação da primeira transação do dia;
- c) o usuário não utiliza outros meios de transporte além do transporte a pé entre as bilhetagens ao longo do dia;

Após a estimativa do local de desembarque, é necessário atribuir qual seria o ponto de ônibus da linha utilizada que ocorreu este desembarque, ou seja, o ponto de ônibus da linha embarcada que mais se aproximada do local estimado de desembarque. Este ponto é então escolhido como mais provável de desembarque daquela transação.

Esta metodologia está ilustrada na Figura C.2, que mostra a representação de um exemplo de uma sequência de três transações ao longo de um dia típico. No início do dia, o usuário sai da sua residência e caminhada até o ponto de parada da primeira linha que irá utilizar, representada pela linha pontilhada vermelha. A localização desta transação é atribuída aquela do registro de GPS com menor diferença de tempo. O desembarque desta transação é estimado sendo o ponto de parada com menor diferença de distância entre ele e o próximo local de embarque, que ocorre na linha verde. Pela noite, o usuário volta para sua residência utilizando a linha azul, e o desembarque final é estimado sendo o ponto desta linha mais próximo do local do primeiro embarque (no exemplo, latitude: -23,45 e longitude: -46,23).

Com a implementação desta metodologia, outros resultados parciais úteis ao planejamento já podem ser obtidos, após as devidas correções e expansões: matrizes de embarque e desembarque por linha e carregamentos por linha. Para a obtenção da matriz origem-destino de viagens, ainda são necessárias outras etapas.

Figura C.2: Exemplo ilustrativo da metodologia de inferência de local de desembarque das transações.

Fonte: Próprio autor.

C.4 Inversão do Sentido das Viagens

Após a estimativa do ponto de desembarque, esta etapa procura corrigir as viagens cujo sentido original que consta nos registros de GPS das linhas não corresponde ao sentido lógico de deslocamento do usuário. Isto é, aquele deslocamento em que o usuário embarca em um ponto e desembarca em um ponto *anterior* ao ponto estimado de embarque. Isso pode ocorrer em algumas situações, por exemplo: quando o sentido da linha cadastrado no registro do GPS estiver incorreto; ou quando o usuário valida o cartão próximo do seu destino na viagem de ida pela manhã em um ônibus e também valida próximo do destino na viagem de volta (neste cenário, o algoritmo estima que o desembarque da viagem de manhã ocorreu próximo ao embarque da viagem de volta, ou seja, incorretamente estimando que o usuário se destinou a um ponto anterior);

Esta situação também tem maior probabilidade de acontecer nos pontos iniciais e finais das linhas pois os usuários podem embarcar normalmente e o sistema do GPS pode ainda não ter realizado a inversão do sentido de operação. Assim, caso seja observado na análise um percurso “negativo”, o sentido da linha utilizada é invertido e as etapas correspondentes às Subseções C.2 e C.3 são recalculadas.

C.5 Verificação de validade da transação

Sistemas de bilhetagem eletrônica podem não registrar corretamente as informações devido a problemas com software, dados, hardware ou de usuário (ROBINSON *et al.*, 2014). Assim, verificações de validade são essenciais para utilizar apenas registros válidos no processamento. Portanto, uma verificação de validade é aplicada para verificar a consistência das transações, filtrando os problemas abaixo:

- Cartões não rastreáveis: os cartões de operadores (cobradores e auxiliar de embarque em estações metroferroviárias) são invalidados pois suas transações não correspondem a uma única pessoa;
- Cartão com apenas uma transação durante o dia: pois não há como estimar um destino para aquela transação utilizando unicamente as informações daquele ID de cartão naquele dia;
- Sem inferência de localização para esta transação: por exemplo, quando há erro na localização do GPS;
- Quando a diferença entre o horário da transação e o registro de GPS associado for maior que 2 minutos: neste caso, a diferença de horário pode significar que a localização da transação está defasada da localização registrada no dado de GPS;
- Código da linha cadastrado no equipamento de GPS diferente do código do validador: neste caso, a transação é invalidada pois há divergência da linha que está sendo operada no GPS e da linha registrada no validador;
- Distância entre a localização estimada da transação até o ponto de parada mais próximo daquela linha maior que 500 metros: esta divergência implica em algumas situações possíveis: ou o ponto de parada onde ocorreu o embarque não está cadastrado na base, ou o usuário passou o cartão no validador entre um ponto de parada e outro, ou seja, a localização estimada para esta transação possivelmente não corresponde com o ponto de embarque efetivo;

- Distância estimada do ponto de desembarque até o local do próximo embarque for maior que 2000 metros: este valor é maior que o utilizado em estudos anteriores (ex. 1km em Munizaga e Palma (2012)) pois usuários no sistema de transporte do Brasil podem fazer a transação depois que o veículo saiu do ponto de parada devido a localização da catraca nos ônibus. Dessa forma, uma distância elevada implica em uma inconsistência entre o ponto de embarque e o local da transação e portanto será invalidada;
- Número negativo de pontos percorridos: no caso de transações que foram ainda estimadas com percurso negativo mesmo após a inversão do sentido das viagens devido a alguma inconsistência;
- Número de pontos percorridos por transação igual a zero: esta condição ocorre quando um usuário valida o cartão imediatamente antes de desembarcar e logo embarca e valida novamente em outro validador, o que acontece com usuários que atrasam muito a validação do cartão, principalmente próximo de terminais, estações de metrô e trechos mais lotados das linhas pelo espaço físico reduzido;

Após a verificação de validade, apenas para as transações válidas é estimado o tempo de viagem, o horário de desembarque e o tempo decorrido entre o desembarque e a próxima transação de modo a estimar as viagens agrupando as transações.

C.6 Estimativa do horário de desembarque das transações

Para que seja possível reconstruir as viagens realizadas através das transações dos cartões, é necessário diferenciar as transações que representam inícios de viagens das transações que representam transferências de uma mesma viagem. Para isso, é adotado o seguinte critério, alinhado com a proposta de Nassir *et al.* (2015): utilização de um tempo limite máximo fora do sistema de transporte. O tempo fora do sistema seria o tempo total decorrido entre o desembarque de uma transação até o embarque seguinte. Um valor comum na literatura para este tempo limite é de 30 minutos. Nesse sentido, é necessário estimar o horário de desembarque correspondente a todas as transações.

O tempo de desembarque é calculado a partir das velocidades estimadas entre pares de pontos de parada por faixa horária. As velocidades entre pontos de parada por faixa horária são estimadas a partir da análise dos dados de GPS das linhas. Para a estimativa do tempo de viagem para sistemas ferroviários (linhas de metrô e trem), o tempo de viagem do GTFS é usado.

C.7 Encadeamento das transações para agrupá-las em viagens (trip chaining)

Para agrupar as transações em viagens, é utilizado o critério do tempo fora do sistema para diferenciar se uma transação é uma nova viagem ou é uma transferência. Todos os IDs dos cartões são percorridos, juntando transações para formar uma viagem no sistema de transporte público. Transações são agrupadas sempre que a diferença de horário estimado entre o momento do desembarque e o horário do próximo embarque estiver abaixo de um limite especificado. As viagens são finalizadas quando este tempo for acima do mesmo limite, por exemplo, de 30 minutos.

No exemplo ilustrativo da Figura C.3, um usuário inicia uma viagem da casa ao trabalho, tendo uma primeira transação às 6h32min. A segunda transação ocorre às 7h24min. Uma vez estimando o horário do desembarque da primeira transação às 7h12min, esta transação é uma transferência, pois o tempo de 12 minutos de diferença é menor que o critério fora do sistema.

Figura C.3: Representação esquemática de um exemplo de uma sequência de viagens inferidas pelas transações.

Fonte: Próprio autor.

As informações de locais (casa, trabalho, faculdade) são ilustrativas pois não há informação do local de destino ou do motivo da viagem nos dados utilizados. Esta análise do tempo fora do sistema continua durante as transações do dia, permitindo separar as viagens para posteriormente gerar a OD. Após o processamento do encadeamento das viagens, uma etapa de validação é conduzida, de forma a eliminar possíveis viagens inválidas.

C.8 Verificação de validade das viagens

Após as viagens terem sido geradas, é aplicada uma etapa de validação de modo a filtrar apenas viagens válidas considerando que:

- A distância de viagem total deve ser maior que zero: garantindo consistência no cálculo da distância total percorrida da viagem (distância acumulada correspondentes a todas as transações realizadas para aquela viagem);
- O número de transferências deve ser entre 0 e 6: o limite de 6 transferências foi escolhido pois é um limitante superior para viajar entre duas regiões periféricas extremas um extensa região urbana; um número 7 ou mais transferências pode implicar que aquela viagem na realidade são duas ou mais, e uma transação de uma nova viagem após uma atividade curta foi incorretamente associada como transferência;
- O ID do Ponto de parada de embarque da primeira transação deve ser diferente do ID de parada do desembarque da última transação associada àquela viagem: ou seja, a viagem deve ter um ponto de parada de destino diferente do ponto de parada inicial; este critério é adotado para evitar incluir viagens onde o usuário se desloca, realiza uma atividade curta (menor que o tempo limite para criar uma nova viagem) e retorna ao ponto inicial;
- O tempo total de viagem (i.e., entre o primeiro embarque e o último desembarque) deve ser entre 1 minuto e 6 horas: dessa forma, são eliminadas viagens extremamente curtas ou longas, pois estas viagens tem uma maior chance de terem sido estimadas incorretamente e não corresponder ao que efetivamente foi realizado pelo usuário. No caso das viagens muito curtas, pode ter ocorrido um erro na estimativa do ponto de embarque e/ou desembarque. Nas viagens longas, pode não ter sido atribuído uma nova viagem corretamente e duas ou mais viagens foram representadas como uma única;
- A velocidade média da viagem deve estar entre 0,01 e 80 km/h: de modo a garantir que os tempos de viagem correspondam aos observados. Velocidades estimadas abaixo de 0,01 ou acima de 80 km/h muito provavelmente correspondem a viagens cujo tempo de viagem ou distância total foram estimadas incorretamente;
- A distância haversine entre o primeiro embarque e o último desembarque deve ser maior ou igual a 300 metros: desta forma, são excluídas as viagens muito curtas

que possivelmente tiveram os pontos de embarque/desembarque estimados incorretamente. Foi adotado o valor de 300 metros por ser uma distância caminhável e também menor que a distância média entre pontos de parada usualmente adotado em cidades.

C.9 Estimação da matriz origem-destino usando fator de expansão por cartão

Por fim, o fator de expansão das viagens é construído para compensar as viagens inválidas: é calculado dividindo a quantidade total de cartões únicos na bilhetagem deste dia com a quantidade de cartões únicos que geraram somente viagens válidas. Este fator de expansão é associado a todas as viagens válidas e assim a matriz origem-destino entre pontos de parada final é construída.

Cabe ressaltar que a validação do total de viagens da metodologia é complexa, exigindo comparação com outras fontes confiáveis de informação. O número de bases de dados envolvidas no estudo (bilhetagem, GPS, GTFS, cadastro de frota, cadastro de estações, pré-embarques) é elevado, podendo existir alguma inconsistência ou falha nos registros. Assim, recomenda-se se possível a validação das informações obtidas através das técnicas descritas em Munizaga *et al.* (2014), por exemplo.