

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
INSTITUTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA

MARCOS PAULO JOSÉ DE MELO SILVA

Otimização Incremental de Percurso de Transporte Público

Maceió
2018

Marcos Paulo José de Melo Silva

Otimização Incremental de Percurso de Transporte Público

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Informática do Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Balduino Fonseca dos Santos Neto

Maceió
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

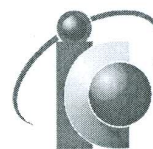
- S586o Silva, Marcos Paulo José de Melo
Otimização incremental de percurso de transporte público / Marcos Paulo José de Melo Silva. – 2018.
131 f. : il. .
- Orientador: Balduino Fonseca dos Santos Neto.
Dissertação (mestrado em Informática) - Universidade Federal de Alagoas.
Instituto de Computação. Maceió, 2017.
- Bibliografia: f. 115-119.
Apêndices: f. 120-131.
1. Transporte público. 2. Otimização matemática. 3. Transporte urbano – Maceió (AL) – Rotas. 4. Linhas de transporte urbano – Maceió (AL). I. Título.

CDU: 004.02:656.132(813.5)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/UFAL
Programa de Pós-Graduação em Informática – PpgI
Instituto de Computação

Campus A. C. Simões BR 104-Norte Km 14 BL 12 Tabuleiro do Martins
Maceió/AL - Brasil CEP: 57.072-970 | Telefone: (082) 3214-1401



Membros da Comissão Julgadora da Dissertação de Marcos Paulo José de Melo Silva, intitulada: “Otimização Incremental de Percurso de Transporte Público”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática da Universidade Federal de Alagoas em 14 de março de 2018, às 17h10, na Sala 01, do Instituto de Computação da UFAL.

COMISSÃO JULGADORA

Prof. Dr. Balduino Fonseca dos Santos Neto
UFAL – Instituto de Computação
Orientador

Prof. Dr. Patrick Henrique da Silva Brito
UFAL – Instituto de Computação
Examinador

Prof. Dr. Aydano Pamponet Machado
UFAL – Instituto de Computação
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo privilégio de poder seguir os meus sonhos e por sempre me guiar nos momentos difíceis da vida. Sem Ele não somos nada.

À minha esposa, Karla Juliana, por estar ao meu lado em todos momentos e por sempre confiar na minha capacidade. Ela foi fundamental para conclusão dessa longa jornada.

Ao meu pai pela dedicação aos seus filhos, sempre empenhado em proporcionar um bem estar para nossa família. À minha mãe por ser tão preocupada conosco, sempre tentando nos proteger e também, o mais importante, por sempre nos amar incondicionalmente. À meu irmão Bruno por sempre me dar palavras encorajadoras.

Ao Márcio Aguiar e ao professor Willy Tiengo por terem me proporcionado oportunidades únicas de aprendizagem durante a minha permanência no LITS/ZUQ.

Aos meus companheiros de turma que me acompanharam durante essa empreitada de trabalhos infindáveis.

À todos meus familiares por serem sempre presentes. E a todos que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão do meu mestrado.

RESUMO

Nos últimos anos, muitos pesquisadores investigaram os problemas da otimização de percursos de transporte público. Os principais objetivos das suas abordagens foram: construir rotas com tempo de viagem curto; reduzir o tempo de espera dos passageiros; minimizar a demanda de viagens não atendidas; reduzir o tamanho das frotas; entre outros. Porém, apesar da grande quantidade de contribuições, eles não consideram os padrões de viagens conhecidos pelos usuários durante a construção das novas rotas. Entretanto, construí-las sem os considerar dificulta a adoção e implantação delas no ambiente urbano real. Sendo assim, o presente trabalho construiu um novo algoritmo capaz de reduzir o custo dos usuários e dos operadores através de poucas mudanças nos percursos existentes com o objetivo de manter os padrões de viagens. Para avaliá-lo, foram utilizados dois *benchmark*. Um é amplamente referenciado em pesquisas anteriores e o outro foi proposto a pouco tempo. Além deles, o algoritmo também foi aplicado na cidade de Maceió/AL. O experimento consistiu em três passos. O primeiro objetiva avaliar a eficácia do novo método. O segundo compara os resultados do algoritmo com os da literatura. O último passo analisa a quantidade de mudanças necessárias para gerar os novos percursos. Por fim, os resultados dos experimentos indicam que a abordagem é capaz de gerar rotas eficazes aplicando poucas mudanças.

Palavras-chaves: Otimização. Transporte público. Linhas de transporte. Percursos de transporte.

ABSTRACT

In recent years, many researchers have investigated the problems of route optimization in public transportation. The main goals in their approaches were: construct routes with short time travelling; reduce the wait time; minimize the travel demands not met; reduce the size of the fleets; among others. Though, despite the large amount of contributions, these approaches do not consider the travel patterns already known by the users when constructing new routes. However, constructing them without considering such patterns makes their adoption and implementation difficult in a real urban environment. Therefore, the present study developed an algorithm capable of reducing the users' and operators' costs with few changes in the existent routes, with the objective of keeping the travel patterns. Two benchmark was used to evaluate this algorithm. One is widely referenced in previous studies and the other was proposed recently. Besides those, the algorithm was also applied in the city of Maceió/AL. The experiment consists in three steps. The first aims to evaluate the new method's efficiency. The second compares the results of the new algorithm to the ones in the literature. The last step analyzes the number of changes required to generate the new routes. Lastly, the results of the experiments indicate that this approach is capable of generating effective routes applying few changes.

Keywords: Optimization. Public transportation. Transport lines. Transportation routes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rede de exemplo com duas rotas de transporte	15
Figura 2 – Funcionamento dos algoritmos de otimização da literatura - v1	16
Figura 3 – Funcionamento dos algoritmos de otimização da literatura - v2	23
Figura 4 – Fases da definição do protocolo da revisão sistemática	28
Figura 5 – Esboço da solução proposta	62
Figura 6 – Exemplo do algoritmo incremental considerando uma rota	64
Figura 7 – Evolução dos cenários da Tabela 8	65
Figura 8 – Rota para explicação da restrição R_{min} e I_{max}	66
Figura 9 – Fluxo de execução do exemplo considerando a restrição I_{max}	67
Figura 10 – Fluxo de execução do exemplo considerando a restrição R_{min}	69
Figura 11 – Exemplo de nós agrupados por região	74
Figura 12 – Fluxo do novo algoritmo	77
Figura 13 – Principal estratégia de validação da literatura	82
Figura 14 – Rede de transporte de Mandl [1980]	84
Figura 15 – Fluxo de execução comum as duas estratégias de experimentos	91
Figura 16 – Fluxo de execução da 1 ^o estratégia do experimento	94
Figura 17 – Fluxo de execução da 2 ^o estratégia do experimento	95
Figura 18 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 4 rotas de Mandl [1980]	96
Figura 19 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 6 rotas de Mandl [1980]	97
Figura 20 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 7 rotas de Mandl [1980]	97
Figura 21 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 8 rotas de Mandl [1980]	98
Figura 22 – Resultados das 500 amostras iniciais do cenário com 60 rotas de Mum- ford [2013]	99
Figura 23 – Resultados das 88 rotas iniciais de Maceió/AL	101
Figura 24 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 4 rotas de Mandl [1980]	104
Figura 25 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 6 rotas de Mandl [1980]	104
Figura 26 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 7 rotas de Mandl [1980]	105
Figura 27 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 8 rotas de Mandl [1980]	105

Figura 28 – Custo dos resultados nos cenários com 4 rotas de Mandl [1980]	106
Figura 29 – Custo dos resultados nos cenários com 6 rotas de Mandl [1980]	106
Figura 30 – Custo dos resultados nos cenários com 7 rotas de Mandl [1980]	106
Figura 31 – Custo dos resultados nos cenários com 8 rotas de Mandl [1980]	107
Figura 32 – Resultado de diferentes bases no cenário com 60 rotas de Mumford [2013]	111
Figura 33 – Custo dos resultados nos cenários com 60 rotas de Mumford [2013]	111
Figura 34 – Resultados de cada iteração na rede de Maceió/AL	112
Figura 35 – Resultados resumidos de cada iteração na rede de Maceió/AL	113
Figura 36 – Grau de semelhança entre os resultados da rede de Maceió/AL	114
Figura 37 – Atividades de planejamento do transporte público	123
Figura 38 – Classes de problemas UTNDP	128
Figura 39 – Comportamento das formigas na busca por comida	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de demanda de viagens de exemplo	16
Tabela 2 – Resumo dos dados extraídos Fonte: Elaborado pelo autor	37
Tabela 3 – Função objetivo e quantidade de trabalhos que a utilizaram	45
Tabela 4 – Redes de transportes analisadas Fonte: Elaborado pelo autor	53
Tabela 5 – Análise da dimensão da rede	56
Tabela 6 – Estatística de quantidade de redes usadas para testar	56
Tabela 7 – Estatística de quantidade propostas comparadas para validação	57
Tabela 8 – Exemplo do algoritmo incremental considerando quatro rotas	65
Tabela 9 – Valores das métricas dos cenários da Tabela 8	65
Tabela 10 – Matriz de demanda de viagem da rede de Mandl [1980]	85
Tabela 11 – Resultados sobre o <i>benchmark</i> de Mandl [1980] Fonte: Elaborado pelo autor	85
Tabela 12 – Demandas de viagens das redes de Mumford [2013]	88
Tabela 13 – Resultados da literatura nas redes de Mumford [2013]	88
Tabela 14 – Resultados para comparações obtidos na rede de Maceió/AL	90
Tabela 15 – Cenários possíveis para a rede de Mandl [1980] e as de Mumford [2013]	93
Tabela 16 – Parâmetros de construção dos cenários iniciais da rede de Mandl [1980]	96
Tabela 17 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Mandl [1980] . . .	98
Tabela 18 – Parâmetros de construção dos cenários iniciais da rede de Mumford [2013]	99
Tabela 19 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Mumford [2013] . .	100
Tabela 20 – Descrição do cenário inicial da cidade de Maceió/AL	101
Tabela 21 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Maceió/AL	102
Tabela 22 – Resultados para realização do teste de hipótese na rede de Mandl [1980]	108
Tabela 23 – Resultados do teste de hipótese para média na rede de Mandl [1980] .	109

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Fundamentos do planejamento de percursos de transporte público	14
1.1.1	Função objetivo	16
1.1.1.1	Exemplo de estrutura de uma função objetivo	18
1.1.2	Restrições operacionais	18
1.1.2.1	Exemplo de estruturas de restrições operacionais	19
1.1.3	Algoritmo	20
1.1.3.1	Exemplo da estrutura de um algoritmo	21
1.1.4	Validação das propostas	21
1.1.4.1	Exemplo da estrutura da validação	21
1.2	Objetivo da Proposta	22
1.3	Relevância	24
1.3.1	Relevância do tema	25
1.3.2	Relevância da Proposta	26
2	REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA	27
2.1	Protocolo	27
2.1.1	Questões de Pesquisa	27
2.1.2	Estratégia de Pesquisa	31
2.1.2.1	Palavras-Chave da Busca	31
2.1.2.2	Base de Dados Bibliográficos	32
2.1.3	Seleção de Estudo	32
2.1.3.1	Critérios de Inclusão	32
2.1.3.2	Critérios de Exclusão	33
2.1.4	Critérios de Qualidade	33
2.1.5	Extração de dados e Síntese	34
2.1.6	Processo de Seleção dos Estudos	35
2.2	Execução da revisão sistemática	36
2.3	Resultados e Análises	37
2.3.1	Principais Dados Coletados	37
2.3.1.1	Resposta da QP1 - O método de otimização proposto busca gerar ganhos para qual parte interessada do sistema de transporte público?	41
2.3.1.2	Resposta da QP2 - Qual a melhoria no sistema de transporte público que a abordagem objetiva alcançar?	42
2.3.1.3	Resposta da QP3 - Quais são as variáveis utilizadas para otimizar o transporte público?	45

2.3.1.4	Resposta da QP4 - Quais das variáveis de otimização são utilizadas para restringir os resultados?	47
2.3.1.5	Resposta da QP5 - Quais são as técnicas/algoritmos de otimização utilizados?	49
2.3.1.6	Resposta da QP6 - Quais são as principais contribuições da proposta?	49
2.3.1.7	Resposta da QP7 - Quais foram as bases de dados testadas?	52
2.3.1.8	Resposta da QP8 - Quais métodos foram comparados com a proposta apresentada?	57
2.3.1.9	Resposta da QP9 - A abordagem foi aplicada em dados de sistemas de transporte reais?	59
2.3.1.10	Resposta da QP10 - Os resultados obtidos com a abordagem foram implantados na cidade onde foi executado o método de otimização?	60
2.3.1.11	Resposta da QP11 - A abordagem de otimização de percurso de transporte considera o desenho do percurso existente ou o desconsidera?	61
3	ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO INCREMENTAL DE PERCURSO DE TRANSPORTE PÚBLICO	62
3.1	Visão geral	62
3.1.1	Exemplo de otimização incremental de uma rota	63
3.1.2	Exemplo de otimização incremental de um sistema de transporte	63
3.1.3	Exemplo de aplicação da restrição R_{min} e I_{max}	65
3.2	Decisões de projeto da abordagem	68
3.3	Função objetivo	71
3.3.1	Sistema de transporte	71
3.3.2	Variáveis	71
3.3.2.1	Cálculo das variáveis	73
3.3.3	Restrições operacionais	75
3.3.4	Modelo de otimização	77
3.4	Algoritmo	77
4	EXPERIMENTO	81
4.1	Estratégias de validação da literatura	81
4.2	Métricas	81
4.2.1	Métricas de eficácia	82
4.2.2	Métricas de custo	82
4.3	Base de dados	83
4.3.1	Rede de Mandl [1980]	83
4.3.1.1	Vantagens	83
4.3.1.2	Desvantagens	84
4.3.1.3	Principais estruturas	84
4.3.1.4	Trabalhos para comparação	84
4.3.2	Redes de Mumford [2013]	87
4.3.2.1	Vantagens	87

4.3.2.2	Desvantagens	87
4.3.2.3	Principais estruturas	87
4.3.2.4	Trabalhos para comparação	88
4.3.3	Rede de Maceió/AL	88
4.3.3.1	Vantagens	89
4.3.3.2	Desvantagens	89
4.3.3.3	Principais estruturas	89
4.3.3.4	Trabalhos para comparação	90
4.4	Metodologia do experimento	90
4.4.1	Questões de pesquisas	90
4.4.2	Estratégias	91
4.4.2.1	1° estratégia	93
4.4.2.2	2° estratégia	94
4.5	Execução do experimento	95
4.5.1	1° estratégia	95
4.5.1.1	Rede de Mandl [1980]	95
4.5.1.1.1	Determinação das rotas iniciais	95
4.5.1.1.2	Parâmetros de execução	98
4.5.1.2	Rede de Mumford [2013] com 127 nós	98
4.5.1.2.1	Determinação das rotas iniciais	98
4.5.1.2.2	Parâmetros de execução	100
4.5.2	2° estratégia	100
4.5.2.1	Redes de Maceió/AL	100
4.5.2.1.1	Determinação das rotas iniciais	100
4.5.2.1.2	Parâmetros de execução	101
4.6	Resultados dos experimentos	102
4.6.1	1° estratégia	103
4.6.1.1	Rede de Mandl [1980]	103
4.6.1.2	Rede de Mumford [2013] com 127 nós	110
4.6.2	2° estratégia	111
4.6.2.1	Redes de Maceió/AL	111
5	CONCLUSÃO	115
5.0.1	Trabalhos futuros	116
	Referências	117
	APÊNDICE A – PROCESSO DE PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE URBANO	122
A.1	Projeto de linhas e definição da frequência dos serviços	123

A.2	Determinação da tabela de horário	124
A.3	Planejamento das rotas dos veículos e escalonamento da tripulação	124
APÊNDICE B – CLASSES DE PROBLEMAS DO TRANSPORTE PÚBLICO 126		
APÊNDICE C – OTIMIZAÇÃO INCREMENTAL DE PERCURSO DE TRANSPORTE PÚBLICO UTILIZANDO ALGORITMO DE COLÔNIA DE FORMIGAS . . . 129		
C.1	Fundamentos do algoritmo de colônia de formigas	129
C.2	Algoritmo incremental utilizando colônia de formigas	129

1 INTRODUÇÃO

O planejamento da mobilidade urbana engloba várias atividades [Farahani et al., 2013, Michaelis and Schöbel, 2009]. Algumas se concentram somente em problemas dos transportes públicos:

- Criação de rotas de transporte público;
- Estabelecimento da frequência de operação de uma linha de transporte;
- A programação dos horários dos veículos de transporte que passam pelos pontos de paradas;
- Definição do cronograma de trabalho da tripulação dos veículos;
- Etc.

Já outras em questões infraestruturais de deslocamento na cidade:

- Criação de estradas;
- Determinação dos sentidos das vias;
- Programação dos semáforos;
- Etc.

Em razão desse vasto campo de atuação, o presente trabalho focará unicamente no **projeto das rotas de transporte público** em uma perspectiva computacional. Entretanto, o Apêndice A realiza uma descrição das outras atividades listadas com o objetivo de fornecer um entendimento global sobre como são estruturadas, além de introduzir alguns conceitos pertinentes.

Por fim, esse capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 1.1 é responsável por descrever os principais conceitos relacionados ao planejamento de percursos de transporte público. Já a Seção 1.2 apresenta o problema identificado e o objetivo do trabalho. Por último, a Seção 1.3 explica a relevância do tema e da nova abordagem.

1.1 Fundamentos do planejamento de percursos de transporte público

O planejamento de percursos de transporte público em uma perspectiva computacional está incluído na classe de problema *Transit Network Design Problem (TNDP)* [Farahani et al., 2013], a qual se preocupa apenas com o projeto (construção) das rotas. Já a outra intitulada de *Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFPS)* além de se preocupar com essa atividade também se interessa pela definição das frequências de operação dos seus serviços. Porém, não foi incluída neste trabalho e por isso não será discutida nessa seção. Outras classes de problema são descritas no Apêndice B.

Para compreender o que é projetar rotas, será fornecido um entendimento inicial sobre o que é uma rede de transporte, um ponto de parada e uma rota. Além desses, outro elemento importante é a matriz de demanda de viajantes, apesar de nem todos os trabalhos a usarem. Porém, por ser fundamental ao presente trabalho, haverá uma explicação preliminar. Após a introdução desses conceitos, um esboço de um algoritmo de construção de percursos será descrito, focando principalmente nas entradas e saídas.

Uma rede de transporte é um grafo formado de nós e arestas. Um nó é um ponto de ônibus ou um ponto de parada para o embarque ou desembarque dos usuários em um veículo. Já uma aresta é uma conexão entre dois nós indicando uma rua que os une. Por fim, uma rota é uma sequência de pontos de ônibus percorrida durante a execução do seu itinerário.

A Figura 1 ilustra uma rede de transporte. Os nós são os círculos e as arestas são as linhas que os conectam, as quais possuem um valor que especifica ou o tempo de deslocamento ou a distância entre os nós adjacentes. Nessa figura também existem dois exemplos de percursos realçados pelas arestas de cor azul e vermelha.

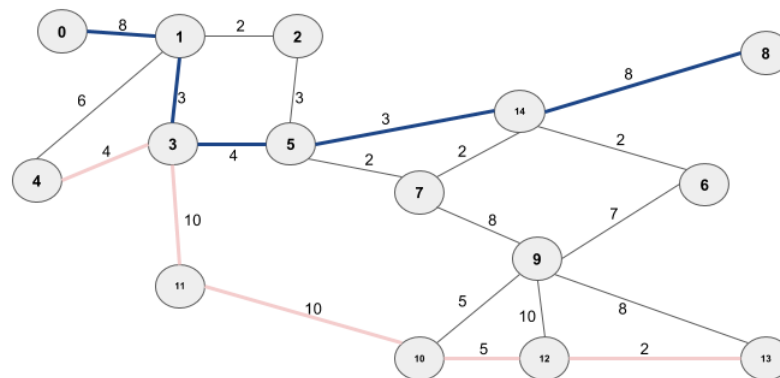


Figura 1 – Rede de exemplo com duas rotas de transporte

Fonte: Adaptado de Mandl [1980]

Já a matriz de demanda fornece a estimativa de viagens entre dois pontos da rede. Algumas indicam a demanda de nó a nó e outras entre regiões. Onde, uma região é um aglomerado de nós entendido como um bairro da cidade. Porém, devido à sua natureza, precisa ser convertida para servir como entrada aos algoritmos, uma vez que consideram o primeiro tipo.

A Tabela 1 contém um exemplo dela com 15 nós enumerados de 0 a 14. Uma entrada nela corresponde a uma estimativa de viagens entre dois pontos de ônibus. Porém, as da diagonal sempre serão 0 porque as demandas para si próprio não são consideradas.

Por conseguinte, a Figura 2 ilustra o funcionamento genérico dos algoritmos de otimização. Nela, uma rede serve de entrada para a produção dos novos percursos que devem satisfazer anseios prévios dos usuários ou dos operadores como, por exemplo, tempo de viagem reduzido, poucas transferências entre linhas, um grau de demanda de viagens

-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 1 – Matriz de demanda de viagens de exemplo

Fonte: [Mandl, 1980]

atendidas alto, etc. Uma das formas de especificá-los é através da definição da função objetivo, que pode ser também multi objetivo.

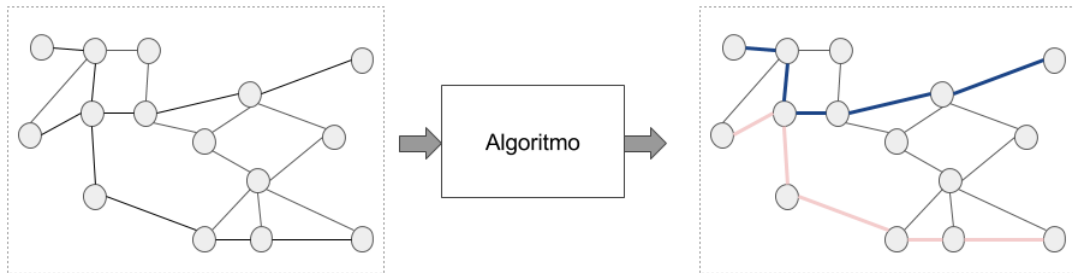


Figura 2 – Funcionamento dos algoritmos de otimização da literatura - v1

Fonte: Elaborado pelo autor

Porém, apesar do exemplo apenas destacar a rede, os algoritmos precisam de mais informações para o seu funcionamento como, por exemplo, a matriz de demanda, a função objetivo, as restrições operacionais, entre outros. Todos esses elementos são necessários para construir os novos percursos, e a escolha de cada um influencia no resultado final.

Por fim, a Seção 1.1.1 apresenta as principais funções objetivo identificadas. Já a Seção 1.1.2 descreve as restrições operacionais mais adotadas. Enquanto, a Seção 1.1.3 lista os principais algoritmos. Por último, a Seção 1.1.4 realiza um esboço dos métodos de validação.

1.1.1 Função objetivo

A otimização das rotas se inicia através da escolha da função objetivo. A partir dela são especificados alguns dos desejos dos planejadores, gerando indícios sobre o formato dos resultados finais. Em algumas situações desejam reduzir o tempo de viagem, em outras

a quantidade de transferências, e assim por diante. Além disso, podem ser divididas em relacionadas ao custo do usuário ou do operador. O primeiro tipo engloba os seguintes objetivos:

- **Maximizar quantidade de passageiros diretos atendidos** [Hu et al., 2005, Pinelli et al., 2016];
- **Minimizar caminhada** [Bielli et al., 2002, Fan and Machemehl, 2008, Xian et al., 2013];
- **Minimizar demanda não atendida** [Blum and Edsell, 2011, Chakroborty, 2003, Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Nayeem et al., 2014, Nikolic and Teodorovic, 2013, 2014, Pternea et al., 2015, Xiaowei et al., 2015, Zarrinmehr et al., 2016];
- **Minimizar tempo de viagem** [Arbex and da Cunha, 2015, Bielli et al., 2002, Blum and Edsell, 2011, Cancela et al., 2015, Chakroborty, 2003, Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Fan et al., 2009, 2013, Hu et al., 2005, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Kiliç and Gök, 2015, Lei et al., 2016, Mauttone and Urquhart, 2009, Mo et al., 2008, Mumford, 2013, Nikolic and Teodorovic, 2013, 2014, Olivera et al., 2008, Pternea et al., 2015, Szeto and Wu, 2011, Xian et al., 2013, Xiaowei et al., 2015];
- **Minimizar quantidade de linhas** [Bielli et al., 2002, Flaut et al., 2008];
- **Minimizar quantidade de transferências** [Arbex and da Cunha, 2015, Bielli et al., 2002, Blum and Edsell, 2011, Chakroborty, 2003, Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Fan and Mumford, 2010, Fan et al., 2009, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Hu et al., 2005, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Kiliç and Gök, 2015, Mumford, 2013, Nayeem et al., 2014, Nikolic and Teodorovic, 2013, 2014, Szeto and Wu, 2011];
- **Minimizar tamanho do percurso** [Fan and Mumford, 2010].

Já os objetivos de redução do custo dos operadores são os seguintes:

- **Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço** [Lei et al., 2016, Martynova et al., 2015, Mo et al., 2008, Yang et al., 2007];
- **Minimizar custo de operação** [Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Olivera et al., 2008];
- **Minimizar percurso total das rotas** [Cipriani et al., 2012, Fan et al., 2009, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kiliç and Gök, 2015, Mauttone and Urquhart, 2009, Mumford, 2013, Zarrinmehr et al., 2016];
- **Minimizar tamanho da frota** [Arbex and da Cunha, 2015, Blum and Edsell, 2011, Cancela et al., 2015, Hu et al., 2005, Nikolic and Teodorovic, 2014, Xiaowei et al., 2015].

Além desses, também foi identificado um não relacionado nem ao usuário e nem ao operador. Ele está preocupado com o impacto do projeto de rotas no meio ambiente:

- **Minimizar emissão de massa poluente** [Pternea et al., 2015].

Por último, observa-se que a maioria dos trabalhos consideram mais de um objetivo. Em razão disso, é adicionado um peso em cada para estabelecer o seu grau de influência no resultado final.

1.1.1.1 Exemplo de estrutura de uma função objetivo

Uma função objetivo foi escolhida para ser descrita e discutida com o intuito de fornecer um entendimento sobre sua importância para os algoritmos de otimização. A selecionada foi apresentada pelo trabalho de Fan and Mumford [2010], cuja abordagem objetivou projetar rotas para minimizar o tamanho do percurso e para minimizar a quantidade de transferências. A sua estrutura foi definida da seguinte forma:

$$\text{Minimize : } Z = A \sum_{i=1}^{i=n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} d_{ij} p_{ij} + B \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{j=n} d_{ij} t_{ij}$$

A primeira parte da equação é responsável por calcular a duração da viagem, já a segunda a quantidade de transferências dos passageiros quando escolhido o menor caminho entre os nós i e j . Por fim, o significado de cada uma das variáveis é:

d_{ij} : Demanda de viagem entre os nós i e j ;

p_{ij} : A menor distância entre i e j considerando as rotas disponíveis;

t_{ij} : O número de transferências para percorrer o menor caminho entre i e j ;

A e B : Essas constantes determinam a influência da duração da viagem e da quantidade de transferências no resultado.

Essa é apenas uma das muitas formas de uma função objetivo. Entretanto, nos trabalhos analisados, a sua essência é a mesma.

1.1.2 Restrições operacionais

As restrições operacionais surgem porque os planejadores desejam limitar o tamanho máximo dos percursos, o tempo máximo de uma viagem, o número de transferências e etc para impedir a construção de rotas inviáveis de operar. Por exemplo, caso a função objetivo escolhida tente elevar o grau da demanda de viajantes atendidos, os novos percursos tenderam a ser grandes. Porém, são custosos para o operador e usuário, uma vez que implicam tempo de viagem grande. Portanto, é importante limitar os seus tamanhos. De modo geral, as principais restrições são as seguintes:

- **A rota não pode ser circular** [Fan and Mumford, 2010, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Mumford, 2013];
- **Conectividade da rede** [Fan and Mumford, 2010, Fan et al., 2009, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Mumford, 2013, Olivera et al., 2008, Xian et al., 2013];
- **Demanda não atendida mínima** [Blum and Edsell, 2011, Fan et al., 2009, Mauttone and Urquhart, 2009, Owais et al., 2016];
- **Duração (tempo) máxima de uma rota** [Fan et al., 2009, Owais et al., 2016];
- **Extensão (comprimento) mínimo e máximo de uma rota** [Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Curtin and Biba, 2011, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Hu et al., 2005, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Lei et al., 2016, Mo et al., 2008, Mumford, 2013, Pternea et al., 2015, Xiaowei et al., 2015, Yang et al., 2007];
- **Não possuir nós repetidos em uma rota** [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014, Szeto and Wu, 2011];
- **Quantidade máxima de transferências de rotas** [Blum and Edsell, 2011, Cancela et al., 2015, Fan et al., 2009, Olivera et al., 2008, Owais et al., 2016, Xiaowei et al., 2015];
- **Quantidade mínima e máxima de nós em uma rota** [Chakroborty and Wivedi, 2002, Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014, Nikolic and Teodorovic, 2014, Szeto and Wu, 2011];
- **Quantidade mínima e máxima de passageiros transportados por uma rota** [Cipriani et al., 2012, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Flaut et al., 2008, Hu et al., 2005, Mo et al., 2008];
- **Quantidade mínima e máxima de rotas** [Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Flaut et al., 2008, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Owais et al., 2016];
- **Quantidade de rotas que percorre uma aresta** [Lei et al., 2016, Mo et al., 2008];
- **Valor máximo da relação entre o tamanho da linha e o menor percurso entre a estação de origem e destino** [Lei et al., 2016, Yang et al., 2007].

Na próxima seção serão apresentadas algumas restrições extraídas de um trabalho que as definiu matematicamente com o objetivo de tornar mais explícito o tratamento delas na literatura.

1.1.2.1 Exemplo de estruturas de restrições operacionais

Para ilustrar algumas restrições operacionais, foi escolhido o trabalho de Hu et al. [2005]. Ele considerou as restrições relacionadas ao tamanho de percurso, fluxo de passa-

geiros e tempo médio de transferência de linhas. Formalmente, foram definidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 5km &\leq \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n l_{ij}x_{ij} \leq 15km \\
 q_x &\leq 1.50 \\
 Q_k &< Q_k^{max} \\
 b_n &\leq 1.50 \\
 ATT &< 3 \\
 x_{ij} &\in (0, 1)
 \end{aligned}$$

Onde, a primeira restrição busca limitar o tamanho do percurso L . Já a segunda tenta restringir o coeficiente não linear q_x , que é a relação entre a distância de uma dada aresta e o tamanho do percurso. A terceira objetiva limitar o fluxo de passageiros Q_{sk} de uma seção de uma rota. Já o quinto limita o coeficiente assimétrico de fluxo de passageiros b_n de uma rota. O penúltimo indica que o tempo médio de transferência ATT deve ser menor que três minutos. Por fim, a última verifica se uma aresta (i, j) pertence ou não a uma rota.

Através desse exemplo, é reforçada a importância das restrições para a otimização, já que é importante gerar rotas operacionais e factíveis.

1.1.3 Algoritmo

A seguir são listados os principais algoritmos adotados pela literatura:

- **Algoritmo de Colônia de Formiga** [Hu et al., 2005, Lei et al., 2016, Martynova et al., 2015, Yang et al., 2007];
- **Algoritmo Genético** [Arbex and da Cunha, 2015, Bielli et al., 2002, Chakroborty, 2003, Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Fan et al., 2009, 2013, Kiliç and Gök, 2015, Mumford, 2013, Nayeem et al., 2014, Olivera et al., 2008, Owais et al., 2016, Pternea et al., 2015, Szeto and Wu, 2011];
- **Algoritmo Guloso** [Zarrinmehr et al., 2016];
- **Busca tabu** [Fan and Machemehl, 2008];
- **Heurística** [Blum and Edsell, 2011, Cipriani et al., 2012, Curtin and Biba, 2011, Fan and Mumford, 2010, Fan et al., 2009, Fan and Machemehl, 2008, Flaut et al., 2008, Kilic and Gok, 2014, Kiliç and Gök, 2015, Mauttone and Urquhart, 2009, Mo et al., 2008, Mumford, 2013, Olivera et al., 2008, Pinelli et al., 2016, Xian et al., 2013];
- **Hill Climbing** [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014];
- **Otimização com Colônia de Abelha** [Nikolic and Teodorovic, 2013, 2014];
- **Otimização por Enxame de Partículas** [Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014];
- **Programação matemática (método analítico)** [Pternea et al., 2015];

- *Simulated Annealing* [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014].

A maioria das abordagens consideram técnicas meta-heurísticas. Já outros deram preferência a abordagens heurísticas. Enquanto poucos consideram puramente a programação matemática (método analítico).

1.1.3.1 Exemplo da estrutura de um algoritmo

Como as estruturas dos algoritmos são mais complexas e ocuparia muito espaço para explicação, não será mostrado um exemplo concreto de uso da literatura, mas será realizada algumas considerações gerais.

Os algoritmos de otimização de rotas consiste basicamente em uma busca de caminho, onde esse último é uma série de pontos de ônibus entre uma origem e um terminal. Por ser um problema combinatorial, as abordagens criam formas de gerá-lo realizando suposições para reduzir o espaço de busca. Por isso, normalmente geram somente um subconjunto de todas possibilidades.

Um dos métodos preferidos é o algoritmo genético. Já outras abordagens usam inteligência de enxame ou inteligência coletiva para gerar os percursos. Alguns exemplos são os algoritmos de colônia de formiga e de abelha. Esses dois simulam o comportamento dos insetos na busca por uma fonte de comida. Por fim, outras técnicas funcionam de modo semelhante, mas sempre considerando uma estratégia diferente para gerá-los.

1.1.4 Validação das propostas

Os trabalhos da literatura usam a validação para produzir indícios sobre a superioridade das suas abordagens. O principal método utiliza um *benchmark* amplamente conhecido e referenciado para realizar comparações com outras abordagens com maior facilidade. Além disso, é preciso definir as métricas para avaliar a qualidade dos resultados. Dessa forma, a validação consiste apenas em verificar se os seus resultados são menores ou maiores do que os dos outros. As duas principais bases de dados utilizadas com esse propósito foram fornecidas por Mandl [1980] e Mumford [2013]. A primeira foi introduzida nos 1980 e possui mais trabalhos para comparação. Já a segunda foi criada nos anos 2013.

1.1.4.1 Exemplo da estrutura da validação

A Seção 4 apresenta detalhadamente o funcionamento dos principais métodos de validação da literatura, por conta disso, não serão realizadas explicações sobre elas na seção atual.

1.2 Objetivo da Proposta

As soluções para projetar rotas são construídas a partir da definição de uma função objetivo, restrições, algoritmo e, por fim, método de validação. Os algoritmos constroem novos percursos que devem minimizar ou maximizar o valor da função objetivo, sujeitos as restrições operacionais definidas. E a validação busca gerar indícios da superioridade da sua solução perante as outras abordagens. Esse esquema é adotado pelos trabalhos que objetivam projetar rotas. A partir dessa estrutura básica, muitas são as possíveis contribuições para melhor lidar com a classe de problema TNDP. As principais observadas são as seguintes:

- **Criação ou adaptação de funções objetivos:** A inovação nessa questão geralmente significa construir novas funções de otimização, ou então incluir novas variáveis ou as organizar de modo diferente nas existentes. Dessa forma, aspectos ignorados passam a ser considerados para gerar um modelo mais realista das necessidades das partes interessadas;
- **Criação ou adaptação de algoritmos:** Como essa classe de problema tem natureza intratável, algoritmos aproximados são construídos para buscar mais soluções ótimas em tempo admissível;
- **Criação ou adaptação de modelos de comportamento dos usuários:** Tais modelos são usados para mensurar a qualidade do sistema de transporte durante a otimização. Portanto, modelar o comportamento do usuário com mais realismo é imprescindível;
- **Criação de novos *benchmark*:** Não é uma contribuição diretamente relacionada à qualidade da solução. Entretanto, permite realizar comparações entre propostas considerando estruturas diferentes das existentes, ou através de novas métricas.

Porém, apesar da grande quantidade de contribuição da literatura, foi identificado um problema não investigado e, portanto, nenhuma solução nesse sentido. As técnicas analisadas não demonstram preocupação em produzir rotas considerando os padrões de viagens estabelecidos. Ou seja, ignoram a expectativa consolidada dos usuários, podendo ocasionar transtornos. Em razão disso, dificilmente seus resultados serão colocados em operação em cenários reais para atender as demandas de viagens. Portanto, destaca-se que a hipótese-problema inicial é a seguinte:

P1: Os métodos de otimização da literatura desconsideram os padrões de viagens previamente estabelecidos pelas rotas existentes. Eles somente estão preocupados em projetar percursos ótimos, o que pode inviabilizar a sua operacionalização.

A Figura 3 ilustra esse problema. A rede e as duas rotas na esquerda indicam o sistema de transporte conhecido pelos usuários. Os padrões de viagens são representados pelos

dois percursos. Porém, a execução de um algoritmo considera apenas a rede do centro da figura. Portanto, o resultado final no lado direito são duas novas rotas diferentes das primeiras. Ou seja, dificilmente serão aceitas.

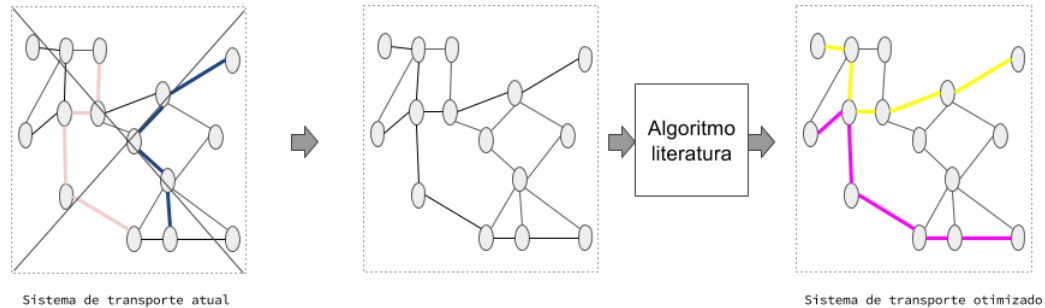


Figura 3 – Funcionamento dos algoritmos de otimização da literatura - v2

Fonte: Elaborado pelo autor

Além das técnicas de otimização analisadas, outras fontes também indicam esse problema. A primeira surge porque o projeto de linhas está incluído dentro da fase de planejamento estratégico do transporte público [Farahani et al., 2013, Michaelis and Schöbel, 2009]. Logo, as suas decisões precisam persistir por um longo período de tempo. Dessa forma, as rotas não podem ser alteradas totalmente a qualquer instante.

Uma segunda justificativa é obtida no trabalho de Curtin and Biba [2011], o qual observa que os planejadores de trânsito desejam desenvolver um conjunto completamente novo de rotas que atendam certos critérios de otimalidade. Porém, isso não é possível para os sistemas em operação há algum tempo, uma vez que os operadores devem respeitar os padrões de viagens existentes criados por eles para a população atualmente beneficiada.

A desconsideração das rotas em operação em um sistema também foi observado por Farahani et al. [2013]. Ele declara que estudos sobre PTNDSP (especialmente aqueles focados com decisões topológicas) na maioria das vezes produzem novas configurações ou uma completa reconfiguração das redes existentes. Por fim, a partir do problema **P1**, surge a necessidade de solucioná-lo. Uma hipótese inicial é a seguinte:

H1 : Para construir um sistema de transporte público aceito com maior facilidade pelos usuários e operadores, é preciso projetar novas rotas considerando o sistema atual. Logo, isso implicará que elas poderão ser colocadas em operação (implantadas) com maior facilidade.

Um método de otimização incremental pode contribuir para solucionar esse problema. Essa nova técnica deve considerar o desenho atual do sistema de transporte para produzir um novo, que deve ser semelhante e otimizado. Dessa forma, mudanças gradativas são indicadas a cada iteração na estrutura existente. Portanto, pode-se formular o objetivo geral desse trabalho como:

OG1 : Criar uma nova restrição para limitar as alterações nos percursos de transporte durante a construção dos novos. Além disso, também propor um algoritmo de otimização incremental. As novas linhas devem respeitar os padrões de viagens estabelecidos previamente. Por fim, elas também precisam ser atrativas, considerando a função objetivo escolhida.

A proposta que é descrita na Seção 3 considera um projeto como operacional e implantável quando não possuir um grande grau de diferença com o sistema anterior. A diferença entre eles é obtida através do número de nós comuns calculados através da operação de interseção. Essa diferença será limitada por uma restrição chamada de **taxa mínima de semelhança** R_{min} , a qual deve ser escolhida pelo planejador.

A avaliação da proposta será realizada através de experimentos fundamentados na metodologia GQM (*Gol, Question, Metric*) [Basili, 1992]. No nível conceitual são definidas as metas (*Gols*) para serem verificadas no final se foram alcançadas. Já no nível operacional são criadas as questões (*Questions*) para serem respondidas. Enquanto no nível quantitativo são definidas as medidas (*Metrics*) de avaliação dos objetivos e das questões.

A Seção 4 lista as questões (*Question*) e as métricas (*Metric*). Já as metas (*Gol*) são introduzidas na seção atual. Elas foram baseadas no objetivo geral **OG1**, que foi dividido por englobar muitos conceitos. Finalizando, elas são definidas a seguir:

- OE1** : Produzir evidências que a otimização incremental melhora a qualidade os percursos de transporte público;
- OE2** : Gerar indícios que o novo método pode produzir rotas para serem colocadas em operação com menos transtornos aos seus usuários;
- OE3** : Gerar evidências que os métodos tradicionais não consideram os percursos bases (os padrões de viagens) para produzir os novos;

O objetivo **OE1** deve ser verificado a partir das métricas de mensuração de qualidade e de eficácia dos resultados. Já o objetivo **OE2** será medido a partir da interseção entre os projetos correntes e os novos, resultando no custo para colocá-los em operação. Enquanto o objetivo **OE3** será alcançado através da análises de trabalhos na área. O estudo deles é realizado na revisão sistemática de literatura na Seção 2.

1.3 Relevância

Essa seção será dividida em duas partes. A primeira irá expor fatos que indicam a relevância do tema mobilidade urbana e sua importância para a sociedade. Já a segunda parte irá focar especificamente no problema tratado na Seção 1.2, que é o objetivo da proposta.

1.3.1 Relevância do tema

As pessoas desejam atingir um destino pretendido [Farahani et al., 2013], devido as mais diversas razões como, por exemplo, ir ao trabalho, ao banco, à casa de um colega, ou até simplesmente a passeio. Diante dessas necessidades básicas, existem os modos de supri-las, que pode ser através da utilização de carros, bicicletas, ônibus, trem, e outros muitos meios de transporte (até caminhada) que tornam esse anseio possível.

Dentre os modos de locomoção, o transporte público é reconhecido como um caminho potencial para reduzir a poluição do ar, diminuição do consumo de combustível, melhorar a mobilidade e diminuir o congestionamento do tráfego veicular. Além disso, um sistema de transporte público eficiente é importante para as áreas urbanas sociais, econômicas e para estrutura física das cidades [Fan and Machemehl, 2004].

Esse meio de transporte pode ser usado pela população, além de ser um transporte compartilhado, diferente do transporte privado. O primeiro modo deve estar ao alcance de todos cidadãos porque ele contribui para o bem estar social e um meio ambientais sustentável, em detrimento ao modo privado.

Entretanto apesar da importância dos transportes coletivos, a realidade presente é a decadência desses modos. Para entender o declínio do transporte público no Brasil, é necessário fazer um comparativo entre dois período. Essa comparação apresenta a relação entre a demanda de viagens de cada modo de transporte. O primeiro é a década de 70. Nesse período a demanda de viagens de ônibus correspondiam a 61% de todas as modalidades de transporte. Os 39% restantes dividia-se entre táxis, trens, barcos, automóveis privados, etc. No segundo período, a partir dos anos 2000, a demanda de viagens para os meios de transporte coletivo diminuiu para 49% e a demanda por transporte privado subiu para 51% [IPEA]. Portanto, nota-se que houve decadência pela procura por meios transporte coletivos. Além disso, a satisfação com o transporte público também diminuiu. Nas cidades com mais de 100 mil habitantes, 41% da população afirmam que o transporte público é ruim [IPEA].

Destaca-se que o aumento da preferência pelo modo de transporte privado traz vantagens para o bem estar ambiental. Por exemplo, esse modo de transporte emite 15 vezes mais poluentes locais e quase duas vezes mais CO_2 (gás causador do efeito estufa) do que o transporte público. Além disso, o transporte privado é responsável por mais de 90% das emissões dos poluentes locais e 63% dos poluentes globais (CO_2) [IPEA]. Logo, uma consequência imediata da escolha do meio de transporte privado é o grande aumento da produção de combustível fóssil.

Concomitantemente, há outros problemas relacionados que contribui para o declínio do transporte público como, por exemplo, a segurança dos seus usuários, que é comprometida pelo assaltos recorrentes. Além disso, é possível destacar outros problemas como a violações de percursos, atrasos, constantes superlotações e longas esperas.

Diante desses problemas na mobilidade urbana, percebe-se a necessidade de investi-

mento em pesquisas que consigam tornar o transporte público atrativo. Já que esse meio de transporte quando bem planejado traz benefícios para todos os envolvidos direta ou indiretamente. Conseqüentemente, a melhora desse modo de transporte estará agregando qualidade para atrair novos usuários.

Para que esse modo de transporte melhore, o planejamento é um elemento fundamental para torná-lo mais atrativo. Junto disso, o planejamento e o projeto de linhas de eficientes é necessário para melhorar a competitividade e participação de uma empresa operadora de transporte público [Kepaptsoglou and Karlaftis, 2009].

1.3.2 Relevância da Proposta

Os métodos tradicionais encontrados na literatura não consideram o padrão de viagem previamente estabelecido. Assim, eles simplesmente procuram gerar rotas ótimas que dificilmente poderão ser aplicadas em contexto operacional real. Por isso, através desse problema identificado, verificou-se a necessidade de construir um novo método de otimização. Ele irá tentar suprir diretamente essa limitação. Para isso, ele tem que considerar os percursos já existentes no sistema de transporte.

O grande diferencial dessa proposta é exatamente a construção de um novo algoritmo que poderá ser utilizado em ambiente prático real. Além disso, a revisão sistemática na Seção 2 realiza um estudo de vários trabalhos que constata que nenhum deles teve suas soluções aplicadas em contexto real.

2 REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

O objetivo da revisão sistemática é identificar, avaliar e interpretar os trabalhos existentes na literatura [Keele, 2007]. Somado a esses objetivos, essa pesquisa objetiva apresentar uma visão geral sobre uma área de conhecimento, provendo um entendimento do estado da arte. Além disso, na revisão sistemática, todo o processo de seleção dos trabalhos tem como meta final produzir uma associação entre os artigos e as questões de pesquisas escolhidas.

O objetivo dessa pesquisa é buscar informações sobre propostas de métodos de otimização de percurso de transporte público. Por isso, a revisão sistemática foi realizada para obter entendimento de modo estruturado sobre esse tema e suas questões pertinentes. Para isso, inicialmente é preciso definir o protocolo de pesquisa, que é feito na Seção 2.1. Esse protocolo define os critérios adotados para incluir ou excluir um artigo para futura análise. Além disso, também são indicadas as informações a serem extraídas dele. Já a Seção 2.2 descreve a execução do processo de seleção dos trabalhos com base no protocolo. Por fim, na Seção 2.3 são analisados os resultados colhidos.

2.1 Protocolo

Nesta seção são apresentados os parâmetros para realização da busca e análise dos trabalhos nas bases de artigos científicos. A definição do protocolo tem como objetivo manter a imparcialidade desse processo. Sendo assim, é dividido nas seguintes atividades:

1. **Determinar as questões de pesquisa:** Elas são as perguntas a serem respondidas após a análise dos artigos;
2. **Formular uma *string* de busca:** Ela é formada pelas palavras chaves para realização da busca nos indexadores científicos;
3. **Escolher os critérios de inclusão e exclusão dos artigos:** São as condições para aceitar ou rejeitar um artigo para ser verificado com maior detalhamento;
4. **Decidir quais são os dados extraídos dos artigos:** Descreve quais informações devem ser extraídas;
5. **Estabelecer o fluxo da revisão sistemática:** Sequencia os passos do processo de escolha e análise das propostas.

A Figura 4 ilustra graficamente essas e as seções seguintes detalham cada uma.

2.1.1 Questões de Pesquisa

Essa revisão sistemática busca entender as soluções e métodos existentes da literatura. Dessa forma, será possível estimar a relevância e qualidade do presente trabalho. Porém,

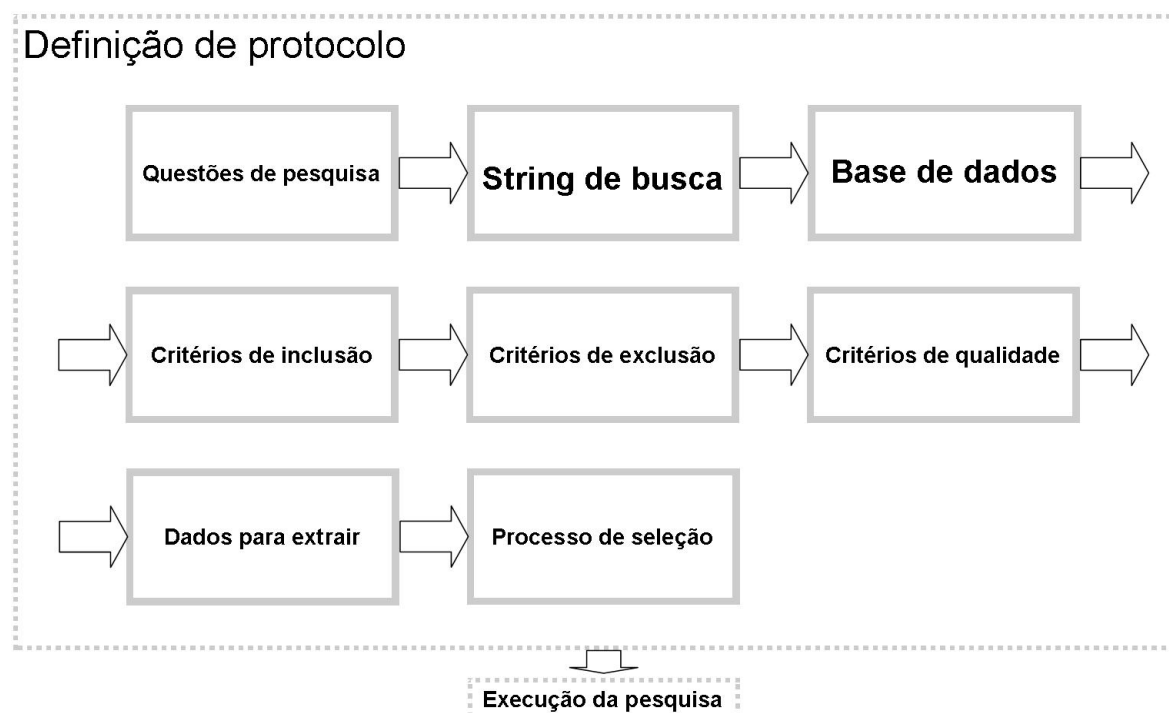


Figura 4 – Fases da definição do protocolo da revisão sistemática

Fonte: Elaborado pelo autor

de modo geral, os principais objetivos dessa pesquisa sistemática são:

- OQ1:** Fornecer uma visão geral sobre como a otimização de percurso transporte público é tratada na literatura;
- OQ2:** Identificar as estruturas dos métodos de otimização de percurso propostos pela literatura;
- OQ3:** Verificar se há preocupação em manter o padrão de viagem conhecido pelos usuários dos sistema de transporte.

A partir deles, derivá-se a seguinte questão de alto nível:

QA1: Quais são e como são utilizados os métodos de otimização para melhorar os desenhos dos percursos do sistema de transporte?

Essa pergunta tenta identificar como os métodos de otimização trabalham, além de fornecer um entendimento global de como esses problemas são abordados na literatura.

Além daqueles objetivos e dessa questão de alto nível, algumas questões de pesquisas mais específicas também podem ser determinadas. Elas buscam encontrar informações detalhadas sobre os métodos introduzidos pela literatura. Portanto, essas questões de pesquisas são as seguintes:

QP1 O método de otimização proposto busca gerar ganhos para qual parte interessada do sistema de transporte público?

A resposta desta questão de pesquisa nos permite entender qual é o público alvo visado pelas abordagens da literatura. Com isso, é possível descobrir qual parte interessada terá preferência nas melhorias. Além disso, é a partir dessa escolha que a função de otimização terá sua estrutura definida, permitindo selecionar variáveis influenciadoras dos custos do usuário ou dos operadores ou de ambos.

QP2 Qual a melhoria no sistema de transporte público que a abordagem objetiva alcançar?

O objetivo desta questão consiste em descrever como a abordagem pretende melhorar o transporte público. Por exemplo: diminuir o tempo de espera do usuário pelo próximo transporte; percentual de demanda atendida pelo sistema de transporte público; o tempo que o passageiro permanece dentro do ônibus; o número de transferências entre transportes realizadas pelos passageiros; etc. Geralmente esse objetivo se materializa nas propostas através de uma função objetivo, que possui uma representação matemática.

QP3 Quais são as variáveis utilizadas para otimizar o transporte público?

Visa elencar quais são as variáveis do sistema de transporte que estão sendo utilizadas para projetar o novo desenho do sistema. Elas possuem valores que dependem dos nós e arestas escolhidas para constituir as linhas de transportes. Pode-se notar que elas são utilizadas nos trabalhos como medidas para quantificar a qualidade do sistema de transporte. Essas variáveis são responsáveis por guiar o processo de geração de novos desenhos de rotas. Como exemplo se tem o percentual de demanda atendida, a extensão do percurso, o tempo de espera do passageiro, etc. Por fim, percebe-se que elas estão intrinsecamente relacionada a função objetivo.

QP4 Quais das variáveis de otimização são utilizadas para restringir os resultados?

Objetiva listar as variáveis que restringem o processo de otimização. Elas servem para garantir limitações impostas pelas expectativas dos usuários e operadores. Por exemplo, os operadores almejam limitar os custos operacionais excessivos. Já os usuários desejam evitar percursos longos. Essas variáveis são auxiliares da função objetivo. Além disso, elas são materializadas da seguinte forma: uma rota não pode ter mais de 2km; o tempo de espera do passageiro é de 20min; a demanda mínima de viagens a ser atendida é 10000; etc.

QP5 Quais são as técnicas/algoritmos de otimização utilizados?

Tal questão busca descobrir quais algoritmos são utilizados para contornar a natureza desses problemas intratáveis. Também tenta identificar se a abordagem foi

matemática, heurística ou meta-heurística. Nas abordagens meta-heurística geralmente se encontra o algoritmo genético, colônia de formigas, etc. Além desses aspectos, a questão visa descobrir estruturas que auxiliem na construção da presente proposta de otimização incremental de transporte.

QP6 Quais são as principais contribuições da proposta?

O objetivo dessa pergunta é descobrir qual foi a contribuição do trabalho para literatura, o que de novo foi inserido pela proposta. Para isso, será analisado se foi adicionado uma nova função objetivo, se foi aplicado um novo algoritmo combinatorio, se a proposta é praticável no seu tempo de processamento, etc. A partir dessa questão tenta-se mensurar a relevância da inovação introduzida pelo método de otimização incremental.

QP7 A efetividade do método de otimização foi avaliada em quais redes de transporte?

A partir da resposta dessa questão, pode-se identificar redes de transporte que sirvam para validar o novo método de otimização incremental. De modo geral, é interessante colher informações sobre as dimensões dessas redes, que inclui a quantidade de nós e arestas. Além dessas informações pode-se tentar também identificar o total de viagens previsto para a rede em análise. Essa questão também pode verificar limitações relativa à escalabilidade da proposta, pois elas podem funcionar em redes de dimensão reduzida, mas talvez não funcione satisfatoriamente em redes reais de cidades urbanas. Ainda nessa questão, pode-se também descobrir as bases de dados mais utilizadas para validar propostas. Sendo esse último ponto interessante para a construção da avaliação da efetividade da presente proposta.

QP8 O método de otimização foi comparado com quais abordagens?

Essa questão de pesquisa irá auxiliar na construção de um entendimento sobre como construir a validação da presente proposta. Serão identificados quais foram os trabalhos comparados. Somado a isso, pode-se gerar uma compreensão sobre a quantidade média de trabalhos utilizados para a validação das propostas.

QP9 A abordagem foi aplicada em dados de sistemas de transporte reais?

Essa pergunta busca descobrir se o algoritmo de otimização proposto foi testado com dados reais de cidades ou dados fictícios. Essa questão também visa identificar critérios de contextos operacionais reais adotados nas propostas.

QP10 Os resultados alcançados a partir da aplicação da técnica de otimização sobre uma cidade real foram implantados (disponibilizados aos usuários)?

Essa pergunta busca descobrir se o resultado proposto pelo algoritmo de otimização foi implantado nas cidades onde ele foi executado. Junto da **QP9**, tenta-se identifi-

car abordagens preocupadas com a viabilidade dos resultados construídos. Ou seja, descobrir se eles são aplicáveis em contexto operacional real.

QP11 A abordagem de otimização de percurso de transporte considera o desenho do percurso existente ou o desconsidera?

Tenta-se descobrir se os desenhos de rotas atuais (antes da otimização) são desconsiderados na otimização das rotas. A premissa é que rotas diferentes geram transtornos para serem implantadas. Por isso, essa questão de pesquisa é importante. Além disso, é um dos focos desta proposta.

2.1.2 Estratégia de Pesquisa

Esta seção define as palavras chaves para realizar a busca dos trabalhos a serem analisados. Porém também é preciso definir quais serão os repositórios ou indexadores de artigos para executar a pesquisa. Tudo isso será descrito nas seções seguintes.

2.1.2.1 Palavras-Chave da Busca

As palavras-chave escolhidas foram as siglas juntamente com sua equivalente por extenso. Algumas palavras são sinônimas de outras, e elas foram incluídas para não haver perda de informações relevantes. Por fim, as palavras-chaves escolhidas para realizar a pesquisa foram as seguintes:

- *Optimization*
- *Bus*
- *Route*
- *Routing*
- *Transportation*
- *Transit*
- *UTNDP*
- *Urban Transportation Network Design Problems*
- *PTNDP*
- *Public Transit Network Design and Scheduling Problem*
- *TNDSP*
- *Transit Network Design and Scheduling Problem*
- *TNDP*
- *Transit Network Design Problem*
- *TNDFSP*
- *Transit Network Design and Frequency Setting Problem*
- *TNFSP*
- *Transit Network Frequency Setting Problem*

- *TNTP*
- *Transit Network Timetabling Problem*
- *TNSP*
- *Transit Network Scheduling Problem*
- *Bus Transport Systems*
- *TRNDP*
- *Transit Route Network Design Problem*
- *Urban Transportation*

Para consultar nos repositórios de artigos foi construído a seguinte *query* de busca:

(TI = (optimization) AND TI =(bus)) OR (TI = (optimization) AND TI =(route) AND TI=(bus)) OR (TI = (optimization) AND TI =(routing) AND TI=(bus)) OR (TI = (optimization) AND TI =(transportation)) OR (TI = (routing) AND TI =(bus)) OR (TI = (benchmarking) AND TI=(bus)) OR TI = (transit routing) OR TI = (transit route) OR TI = (transit network design) OR TI = (UTNDP) OR TI = (Urban Transportation Network Design Problems) OR TI = (PTNDP) OR TI = (Public Transit Network Design and Scheduling Problem) OR TI = (TNDSP) OR TI = (Transit Network Design and Scheduling Problem) OR TI = (TNDP) OR TI = (Transit Network Design Problem) OR TI = (Transit Network Design Problem) OR TI = (TNDFSP) OR TI = (Transit Network Frequency Setting Problem) OR TI = (TNTP) OR TI = (Transit Network Timetabling Problem) OR TI = (TNSP) OR TI = (Transit Network Scheduling Problem) OR TI = (Bus transport systems) OR TI = (TRNDP) OR TI = (Transit Route Network Design Problem)

2.1.2.2 Base de Dados Bibliográficos

A base de dados escolhida foi o *ISI Web of Science*. Através dela serão selecionados os trabalhos relacionados. Tal base foi escolhida por sua confiabilidade e ampla utilização.

2.1.3 Seleção de Estudo

A *query* de consulta retornará uma grande quantidade de resultados. Por isso, é necessário especificar critérios (ou condições) para selecionar os trabalho que serão examinados ou não. Tais critérios serão apresentados nas duas seções seguintes. Além disso, eles são divididos em critérios de inclusão ou exclusão.

2.1.3.1 Critérios de Inclusão

Essas condições indicam se um trabalho é analisado. Os critérios escolhidos são listados a seguir:

1. Ser uma fonte primária, ou seja, estar relacionado diretamente a alguma das questões de pesquisa;
2. Ser um trabalho que possui respostas para as questões de pesquisa;
3. Ser um trabalho que lida diretamente com a otimização de percursos de transporte;
4. Possuir abordagens/técnicas que podem auxiliar no desenvolvimento de uma técnica de otimização incremental de percurso;
5. Possuir abordagens/técnicas que podem contribuir para o desenvolvimento de um modelo de demanda adequado ao problema tratado;
6. Ser um trabalho sobre transporte público urbano;
7. Propor novos modelos de otimização e que também possa contribuir na construção de um novo;
8. Ser relacionado à qualidade de transporte público.

2.1.3.2 Critérios de Exclusão

Os trabalhos que não devem ser analisados são aqueles que não apresentam relevância para a pesquisa sistemática. As condições para que um trabalho não seja considerado foram as seguintes:

1. Ser fonte secundária;
2. Não ter sido submetido a revisão;
3. Não ser em inglês;
4. Similar do mesmo autor;
5. Não estar disponível;
6. Ser publicado antes de 2000;
7. Não responder as questões de pesquisa.

2.1.4 Critérios de Qualidade

Os critérios de qualidade indicam a ordem de análise dos trabalhos a partir de sua relevância. Para isso, é realizada uma verificação deles seguindo alguns critérios. Genericamente, aqueles mais relevantes são os que respondem as questões de pesquisa e que possuem um grau de qualidade satisfatório. A seguir são apresentadas as características de qualidade que um trabalho deve possuir:

1. Número considerável de citações;
2. Canal de publicação relevante, principalmente as *conferências* e as *revistas*;
3. Descrição clara e concisa da técnica proposta;
4. Caracterização adequada do contexto;
5. Discutir detalhadamente os resultados;
6. Indicação das limitações.

2.1.5 Extração de dados e Síntese

Selecionados os trabalhos, as informações podem ser extraídas. Entretanto, antes dessa atividade, é importante declarar aquelas que devem ser extraídas, já que facilita a análise dos artigos. Por fim, as que devem extraídas das propostas são:

1. **Identificador** - Um código único que identifica o estudo;
2. **Data da extração** - A data de extração das informações;
3. **Título** - O título do trabalho analisado;
4. **Autores** - Os nomes dos criadores do artigo;
5. **Ano** - Data de publicação do trabalho;
6. **Tipo (Revista, Conferência, Capítulo de livro)** - Meio de veiculação do trabalho;
7. **Objetivo geral** - Descrição concisa do objetivo do trabalho, especificando quais são seus principais aspectos;
8. **(QP1) - [custo] A abordagem considera o custo de qual parte interessada?**
- Indicar se a abordagem considera o custo do usuário, do operador ou de outra parte;
9. **(QP2) - [função objetivo] Descrever a melhoria a ser alcançado com a função objetivo da proposta** - Identificar a função objetivo, algumas delas são:
|
 - a) Maximizar quantidade de passageiros diretos atendidos;
 - b) Minimizar tamanho do percurso;
 - c) Minimizar caminhada;
 - d) Minimizar tempo de espera;
 - e) Minimizar tempo de viagem;
 - f) Minimizar quantidade de transferências;
 - g) Minimizar quantidade de linhas;
 - h) Minimizar demanda não atendida;
 - i) Minimizar tamanho da frota;
 - j) Minimizar percurso total das rotas;
 - k) Minimizar custo de operação;
 - l) Maximizar a quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço
10. **(QP3) - [variáveis] Variáveis consideradas na função objetivo** - Extrair as variáveis da função objetivo;
11. **(QP4) - [restrições] Restrições aplicadas aos resultados gerados pelos algoritmos** - Obter as restrições operacionais do modelo;
12. **(QP5) - [soluções] Técnicas/Algoritmos de solução (matemático, heurístico, meta-heurístico)** - Identificar os métodos adotados para gerar soluções factíveis;

13. **(QP6) - [contribuições] Descrever as principais contribuições** - Elencar as principais contribuições proferidas pelos autores, indicando o que de novo foi inserido na otimização de percurso;
14. **(QP7) - [bases de dados testadas] Descrever bases de dados utilizadas para validação** - Identificar as estruturas das redes de transporte para validação.
15. **(QP8) - [métodos testados] Apresenta os métodos comparados com a proposta** - Listar os métodos para testar a proposta e validação do otimizador.
16. **(QP9) - [se foi aplicado em sistemas reais] Identificar se a abordagem foi aplicada em dados reais ou simulados** - Verificar se a proposta apresentada foi utilizada em dados reais.
17. **(QP10) - [se o resultado da abordagem foi implantado] Verificar se a soluções apresentadas foram implantadas** - Verificar se os resultados obtidos com a execução do método foi colocado em operação na cidade alvo.
18. **(QP11) - [se considera os dados existentes] Se considera o desenho de transporte público existente** - Indicar se a abordagem considera o projeto das rotas do transporte público base (aquelas com os padrões de viagens conhecidos pelos usuários).

2.1.6 Processo de Seleção dos Estudos

Essa seção explica o modo de análise dos trabalhos selecionados pela *string* de busca. Tal procedimento tem como objetivo decidir sobre a inclusão ou não dos artigos para extração dos dados segundo os critérios definidos. Essa decisão pode ocorrer em algum dos níveis de análise, que inicia na leitura do título e finaliza com a verificação de todas as seções. Por fim, a sequência para tomada de decisão é a seguinte:

1. Analisar título

O título condiz com as questões de pesquisa? Isto é, excluir trabalhos que possuam títulos que não apresentem relação as questões de pesquisas definidas na Seção 2.1.1.

2. Analisar resumo (*Abstract*)

Contribui relevantemente com o trabalho proposto? Desconsiderar trabalhos que fujam do escopo da pesquisa ou que não possua uma contribuição relevante.

3. Analisar introdução e conclusão

Verificar se tem uma fundamentação adequada e se adiciona novos conceitos ao estado a arte.

4. Analisar todas seções

Analisar profundamente o trabalho e extrair aquilo que irá auxiliar na proposta.

Em todas essas etapas são verificados os critérios de inclusão ou exclusão dos trabalhos. Dessa forma, o processo de análise tenderá a ser executado mais rápido, já que a quantidade de informações nos primeiros níveis é menor.

2.2 Execução da revisão sistemática

Nessa seção são apresentados os resultados quantitativos obtidos a partir da execução da revisão sistemática. Para auxiliar nesse processo, utilizou-se a ferramenta *StArt*¹ (*State of the Art through Systematic Review*). Ela tem como propósito auxiliar na revisão de literatura. Sendo assim, a sua execução é dividida em três fases. A primeira foca no planejamento, e por isso nela é possível inserir o protocolo de busca. Já a segunda realiza a pesquisa. Dessa forma, os artigos encontrados são adicionados, e as informações são extraídas para avaliação. Por fim, a terceira etapa é a sumarização. Como resultado, são produzidas tabelas e gráficos que relacionam os artigos com as questões respondidas.

Por fim, o processo da revisão sistemática realizado resultou nos seguintes passos:

- **Passo 1:** Identificar (busca) estudos relevantes utilizando a *string* de busca definida com base na base de dados (Data da busca: 04/07/2017);
 - Web of Science;
 - * Resultados encontrados: 1.587;
- **Passo 2:** Refinamento da busca com base na data de publicação na base de dados (publicações a partir de 2000);
 - Web of Science;
 - * Resultados encontrados: 1.334;
- **Passo 3:** Excluir estudos com base nos seus títulos;
 - Artigos remanescentes: 386;
- **Passo 5:** Excluir estudos com base nos seus resumos (abstracts);
 - Artigos remanescentes: 76;
- **Passo 6:** Excluir estudos com base na disponibilidade (artigos que não estão acessíveis);
 - Artigos remanescentes: 61;
- **Passo 7:** Excluir estudos com base na sua Introdução e Conclusão;
 - Artigos remanescentes: 34;
- **Passo 8:** Obter os artigos primários e analisar criticamente os estudos.
 - Artigos remanescentes: 0 (todos analisados, não restou nenhum a ser analisado).

¹ <http://lapes.dc.ufscar.br/tools/start_tool>

2.3 Resultados e Análises

O objetivo dessa seção é apresentar os principais resultados extraídos dos artigos obtidos na revisão sistemática. Os dados apresentados estarão relacionados às questões de pesquisas definidas, apesar de uma prévia sumarização na Tabela 2.

2.3.1 Principais Dados Coletados

A Tabela 2 apresenta um resumo dos dados extraídos dos artigos. A primeira coluna indica o trabalho, a segunda a função objetivo, a terceira o tipo de algoritmo e a última a quantidade de abordagens comparadas na validação. Informações detalhadas são apresentadas nas respostas das questões de pesquisa estruturadas nas Seções 2.3.1.1, 2.3.1.2, 2.3.1.3, 2.3.1.4, 2.3.1.5, 2.3.1.6, 2.3.1.7, 2.3.1.8, 2.3.1.9, 2.3.1.10 e 2.3.1.11.

Tabela 2 – Resumo dos dados extraídos

Fonte: Elaborado pelo autor

Trabalho	Objetivo	Método	Comparações
Chakroborty and Wivedi [2002]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida 	Algoritmo genético	3
Bielli et al. [2002]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar caminhada • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar quantidade de linhas 	Algoritmo genético	0
Chakroborty [2003]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida 	Algoritmo genético	3
Hu et al. [2005]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar quantidade de passageiros diretos atendidos • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar tamanho da frota 	Algoritmo de colônia de formiga (routing problem). Algoritmo genético (Headway problem)	0

Tabela 2 (Continua)

Trabalho	Objetivo	Método	Comparações
Yang et al. [2007]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço 	Algoritmo de colônia de formigas	2
Fan and Mumford [2010]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tamanho do percurso • Minimizar quantidade de transferências 	Hill Climbing e Simulated Annealing	3
Mo et al. [2008]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço 	Heurística	0
Fan and Mächemehl [2008]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar caminhada • Minimizar tempo de espera • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar custo de operação 	Heurística	1
Olivera et al. [2008]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar custo de operação 	Heurística	0
Flaut et al. [2008]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar quantidade de linhas 	Heurística	0
Mauttone and Urquhart [2009]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar percurso total das rotas 	Heurística	1
Fan et al. [2009]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar percurso total das rotas 	Heurística	3
Szeto and Wu [2011]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências 	Algoritmo genético	1
Curtin and Biba [2011]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar valor do serviço da rota 	Heurística	0

Tabela 2 (Continua)

Trabalho	Objetivo	Método	Comparações
Blum and Edsell [2011]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar tamanho da frota 	Heurística	0
Cipriani et al. [2012]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar percurso total das rotas 	Algoritmo genético paralelo	0
Mumford [2013]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar percurso total das rotas 	Heurística	1
Nikolic and Teodorovic [2013]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida 	Otimização com colônia de abelha	6
Fan et al. [2013]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar custo de operação 	Algoritmo genético	0
Xian et al. [2013]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar caminhada • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem 	Heurística	5
Kilic and Gok [2014]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências 	Heurística	4

Tabela 2 (Continua)

Trabalho	Objetivo	Método	Comparações
Kechagiopoulos and Beligianis [2014]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar percurso total das rotas 	Optimização por enxame de partículas	7
Nikolic and Teodorovic [2014]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida • Minimizar tamanho da frota 	Otimização com colônia de abelhas	5
Nayeem et al. [2014]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar demanda não atendida 	Algoritmo genético com elitismo (GAWE)	7
Martynova et al. [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço 	Algoritmo de colônia de formiga	0
Xiaowei et al. [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar a quantidade de passageiros atendidos • Minimizar tempo de viagem • Minimizar demanda não atendida • Minimizar tamanho da frota 	Teoria do prospecto cumulativa	1
Kiliç and Gök [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar percurso total das rotas 	Algoritmo genético e o método NSGA-II	0
Cancela et al. [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar tamanho da frota 	Programação matemática	3
Pternea et al. [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar demanda não atendida • Minimizar a emissão de massa poluente 	Algoritmo genético	0

Tabela 2 (Continua)

Trabalho	Objetivo	Método	Comparações
Arbex and da Cunha [2015]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de espera • Minimizar tempo de viagem • Minimizar quantidade de transferências • Minimizar tamanho da frota 	Algoritmo genético	6
Lei et al. [2016]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço 	Algoritmo de colônia de formiga	0
Owais et al. [2016]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar tempo de viagem • Minimizar o desvio do menor percurso 	Algoritmo genético	6
Pinelli et al. [2016]	<ul style="list-style-type: none"> • Maximizar passageiros diretos atendidos 	Heurística	0
Zarrinmehr et al. [2016]	<ul style="list-style-type: none"> • Minimizar demanda não atendida • Minimizar percurso total das rotas 	Algoritmo guloso	0

Com esses dados coletados, há material necessário para responder as questões de pesquisas levantadas. Sendo assim, as suas respostas são apresentadas nas seções seguintes.

2.3.1.1 Resposta da QP1 - O método de otimização proposto busca gerar ganhos para qual parte interessada do sistema de transporte público?

Esta questão de pesquisa busca descobrir as principais partes interessadas. O usuário e o operador são os principais afetados pelo modo como o transporte é projetado. Além desses dois, o meio ambiente foi considerado por um trabalho que objetivou reduzir a emissão de massa poluente. Por fim, algumas das características dessas partes interessadas são:

- **Usuário:** O trabalho com foco no usuário busca minimizar as seguintes variáveis: tempo de caminhada, tempo de espera, tempo de viagem, tamanho do percurso, quantidade de transferências e número de linhas. Além dessas, outra função objetivo tenta maximizar quantidade de passageiros atendidos diretamente;
- **Operador:** Essa parte interessada busca minimizar: tamanho da frota, tempo total dos percursos e custo de operação. Além desses, ela também deseja maximizar a quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço. Nessa última situação,

os trabalhos adicionam algumas restrições para gerar rotas atrativas para o usuário também;

- **Meio ambiente:** Tal parte interessada possui interesse em minimizar a quantidade de massa poluente na atmosfera.

Foram analisados detalhadamente 34 trabalhos. Todos eles possuem como parte interessada o usuário, já que eles desejam construir percursos vantajosos para esse público. Já 23 trabalhos estão interessados em soluções vantajosas tanto para o usuário como para o operador. Nota-se que essas propostas no geral sempre estão preocupadas em criar técnicas que produzem resultados adequados para o usuário. E quando considerado o interesse do operador, o trabalho também lida com aspectos vantajosos para ele. Além disso, constatou-se que apenas um trabalho demonstrou interesse explícito no meio ambiente. Por fim, destaca-se que a preferência pode ser percebida através das funções objetivo de cada proposta.

2.3.1.2 Resposta da QP2 - Qual a melhoria no sistema de transporte público que a abordagem objetiva alcançar?

Nesta questão de pesquisa são apresentadas as funções objetivo identificadas. Como já realizado na **QP1**, pode-se dividir essas funções objetivo em relacionadas ao custo do usuário ou ao do operador. Aquelas que visam atender os anseios dos usuário são introduzidas a seguir:

- **Maximizar quantidade de passageiros diretos atendidos:** Através desta função objetivo se busca construir rotas que atendam a maior quantidade de passageiros de modo direto. A demanda de viagens diretas é aquela que não precisa realizar nenhuma transferência para alcançar o destino. Por fim, o efeito colateral disso é a produção de rotas grandes;
- **Minimizar caminhada:** Objetiva diminuir a distância percorrida pelo usuário para alcançar o transporte público. O ponto de parada do ônibus é referência para calcular essa distância. Na Tabela 2 é possível verificar os trabalhos com essa função objetivo;
- **Minimizar demanda não atendida:** O trabalho de Blum and Edsell [2011] relaciona esse objetivo ao custo do passageiro. Já em Fan et al. [2013] é explicado o cálculo desta métrica. O trabalho Nikolic and Teodorovic [2013] considera a demanda não atendida como aquela que o passageiro precisa realizar mais de duas transferências para alcançar o destino;
- **Minimizar tempo de viagem:** Esse objetivo foi escolhido por uma quantidade grande de trabalhos. Para mensurá-lo, é preciso estimar o tempo de deslocamento de um nó a outro. O cálculo depende da velocidade média e do tamanho da aresta. Geralmente, os trabalhos registram as velocidades estimadas de cada aresta em

uma matriz de velocidade. Ressalta-se que esse objetivo é mais indicado do que o minimizar o tamanho do percurso porque nem sempre o menor percurso é o mais rápido. Há percursos pequenos que são mais demorados do que outros mais longo;

- **Minimizar quantidade de linhas:** A criação de linhas grandes permite diminuir o número necessário delas em um sistema de transporte. A consequência disso é a diminuição da quantidade de transferências para alcançar o destino pretendido [Flaut et al., 2008]. Porém, a desvantagem é a geração de linhas extensas que implicam maior tempo para o usuário alcançar o seu destino;
- **Minimizar quantidade de transferências:** Essa função objetivo implica a redução do tempo de viagem e do custo do usuário (para os ambientes sem integração temporal). A realização de uma transferência envolve tempo desperdiçado. Para fins de modelagem do problema, os trabalhos analisados acrescem 5 minutos ao tempo de viagem para cada transferência. Além disso, o custo do usuário aumenta porque cada mudança de linha exige o pagamento de uma nova da tarifa de transporte;
- **Minimizar tamanho do percurso:** O princípio desse objetivo é que uma rota menos extensa é mais rápida. Entretanto, isso não é verdade para todas situações. Como consequência, somente um trabalho analisado considerou tal objetivo. Além disso, o trabalho Fan and Mumford [2010] reforça que esse objetivo está relacionado ao custo do usuário;
- **Minimizar tempo de espera:** A diminuição do tempo de espera pertence a classe de problema TNDFSP, pois é necessário manipular a frequência do serviço para atingir esse objetivo. Dessa forma, as abordagens com esse objetivo preocupam-se em determinar a periodicidade de execução de um percurso de transporte durante um dia.

A seguir são apresentados os objetivos que buscam atender as necessidades do operador de transporte:

- **Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço:** O trabalho de Mo et al. [2008] afirma que o aumento da densidade direta é mais econômico e eficiente para rede. Esse objetivo tentar aumentar a quantidade de usuários por unidade de espaço. Dessa forma, não é preciso gerar rotas grandes para atender uma demanda significativa. O aumento da demanda atendida por unidade de espaço gera ganhos ao operador que não precisa criar um número maior de rotas para atender a demanda de viagens, diminuindo os custos operacionais. Apesar do benefício explícito ao operador, esse objetivo está relacionado a outros elementos que implicam vantagens ao usuário. O trabalho de Mo et al. [2008], além de maximizar a densidade direta de passageiros, também objetiva minimizar o tempo de viagem usuário. Já o trabalho de Yang et al. [2007] não utiliza outra função objetivo, mas uma restrição de interesse do usuário. Tal restrição limita

o tamanho da rota, ela é chamada de *nonlinear constraint*. Ressalta-se que rotas grandes são ruins para o usuário porque o tempo de viagem aumenta. Por isso esse limitante é importante nessa situação. Além disso, essa condição é uma medida relativa entre o tamanho da rota e o menor percurso.

- **Minimizar custo de operação:** O custo de operação pode ser calculado com a seguinte fórmula: $valor_passagem \times numero_passageiros - valor_quilometro \times tamanho_percurso$ [Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013];
- **Minimizar percurso total das rotas:** Segundo Mauttone and Urquhart [2009], esse objetivo está associado ao custo do operador. Já em Kechagiopoulos and Beligiannis [2014], o consumo de combustível é associado ao tamanho total. Por isso, o crescimento dos percursos aumenta o custo operacional. O Mumford [2013] observa que rotas grandes implica maior tempo para os veículos concluí-las. Dessa forma, mais veículos são exigidos, conseqüentemente o custo do operador aumenta. Por fim, o Fan et al. [2009] compara o número de veículos com a distância total percorrida, que influencia nesse objetivo;
- **Minimizar tamanho da frota:** Consiste em diminuir a quantidade de veículos da frota necessários para operar as rotas de transporte. Além das rotas, eles também precisam determinar a frequência do serviço, como as abordagens de Hu et al. [2005], Blum and Edsell [2011] e Nikolic and Teodorovic [2014]. Ou seja, são problemas que fazem parte da classe TNDPSP;
- **Minimizar tempo total de viagem das rotas:** Esse objetivo inclui no seu cálculo todas viagens realizadas pelos transportes. Ele é semelhante ao objetivo anterior mas com um padrão de medida diferente. O Cipriani et al. [2012] associa esse objetivo ao custo do operador;

Para finalizar, houve um objetivo que não pode ser relacionado nem ao custo do usuário nem do operador. Ele está relacionado ao impacto do projeto de rotas no meio ambiente. Esse objetivo é:

- **Minimizar a emissão de massa poluente:** Apenas o trabalho de Pternea et al. [2015] demonstrou explicitamente a intenção de construir percursos com o menor impacto ambiental possível. Ele apresenta uma fórmula para calcular a quantidade de massa poluente emitida na atmosfera. Por isso foi possível tentar minimizar essa massa.

Finalizada a descrição de cada uma das funções objetivos, a Tabela 3 lista a quantidade de trabalhos que as usaram. Observar-se que há uma preferência por *Maximizar tempo de viagem* e *Minimizar quantidade de transferências*. Isso possivelmente ocorre por serem objetivos que favorecem ao usuário. Além disso, nota-se que há uma relação entre o tempo de viagem e a quantidade de transferências, já que o tempo de viagem também é

Função objetivo	Quantidade de propostas
Maximizar quantidade de passageiros diretos atendidos	3
Minimizar tamanho do percurso	1
Minimizar caminhada	3
Minimizar tempo de espera	10
Minimizar tempo de viagem	26
Minimizar quantidade de transferências	19
Minimizar quantidade de linhas	2
Minimizar demanda não atendida	13
Minimizar tamanho da frota	6
Minimizar percurso total das rotas	7
Minimizar custo de operação	3
Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço	4
Minimizar a emissão de massa poluente	1

Tabela 3 – Função objetivo e quantidade de trabalhos que a utilizaram

Fonte: Elaborado pelo autor

determinado pela quantidade de transferências em uma viagem. Em alguns trabalhos, é dado uma penalidade de 5 minutos a cada transferência.

Após essas duas funções objetivo, a *Minimizar tempo de espera* é a mais utilizada dentre as listadas, provavelmente porque esta considera o usuário na otimização. Enquanto a *Maximizar quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço* é uma das com menor quantidade de trabalhos. Porém, isso pode ser justificado por ela ter sido introduzida recentemente (comparada com as outras).

Existem trabalhos muito antigos que lidam com o tempo de viagem e número de transferências. Um exemplo é o trabalho de Mandl [1980], que introduziu uma base de dados de referência para ser testada por futuras proposta de algoritmos da classe TNDP. Além disso, apresentou os parâmetros de medição de qualidade. Dentre os parâmetros de qualidade, está o tempo médio de viagem e a quantidade de transferências. Tal exemplo foi exposto para exemplificar o porquê da preferência por esses objetivos.

2.3.1.3 Resposta da QP3 - Quais são as variáveis utilizadas para otimizar o transporte público?

As variáveis servem para medir a qualidade (ou quantificar objetivamente) o sistema de transporte público. Elas estão diretamente relacionadas à função objetivo. Na maioria das situações, a mensuração delas é realizada a partir de informações da sequência de nós e arestas.

As variáveis encontradas possuem formas distintas, por isso, foram realizadas algumas simplificações para padronizar o entendimento delas. Além disso, as nomenclaturas adotadas pelos trabalhos são variadas, por essa razão elas não são expostas. Por fim, as principais variáveis identificadas são resumidas a seguir:

- **Tempo de caminhada:** É o tempo que usuário perde para se deslocar até um ponto de transporte. Poucos trabalhos a consideraram;
- **Tempo de viagem:** A partir da sequência de arestas e da estimativa da duração do deslocamento em cada uma, é possível calcular o tempo necessário para percorrer uma rota de transporte. Inicialmente, não é considerada a transferência entre rotas de passageiro. Admitir essa possibilidade implica adicionar um tempo extra como penalidade por cada alteração efetuada. Os trabalhos que a admitem adicionam um tempo extra de 5 minutos a cada mudança;
- **Percurso total da viagem:** Esta variável serve para indicar o tamanho dos percursos. O seu cálculo é realizado através da soma da distância de todas arestas pertencentes as rotas;
- **Número de transferências realizadas entre rotas:** Esta medida está relacionada ao problema de nível inferior (também denominada de *traffic assignment*). Ela depende da modelagem do comportamento do usuário. É necessário realizar algumas suposições para calcular essa variável. Uma possível consiste em determinar que os passageiros sempre percorram o menor caminho entre a origem e o destino. A partir dessa consideração, a quantidade de transferências pode ser mensurada;
- **Viajantes diretos:** Esta variável é um caso particular do número de transferências porque nesta situação é calculada somente a quantidade de viagens que não precisam realizar transferências. Ou seja, número de transferências é igual a zero. Resumidamente, é a quantidade de passageiros que utilizam uma única rota para atingir o destino;
- **Demanda atendida:** Esta medida visa descobrir a quantidade de viagens atendidas pelo sistema de transporte. Consequentemente, também é possível obter a demanda não atendida;
- **Frequência do serviço:** É a periodicidade de operação da linha. Ela determina a frequência de operação da linha em um determinado período de tempo;
- **Tempo de espera:** Esta variável mensura a quantidade tempo de espera do usuário para conseguir utilizar um transporte público. Ressalta-se que ela está relacionada à frequência do serviço;
- **Massa poluente:** Indica a quantidade de elementos poluentes emitidos na atmosfera pelo transporte público.

As variáveis *frequência do serviço* e *tempo de espera* fazem parte da classe de problemas TNDSP. Dessa forma, elas também estão preocupadas em determinar a quantidade de viagens de uma rota durante um intervalo de tempo. Entretanto, a presente proposta não está preocupada com essas questões. Portanto, poderia-se omitir essas variáveis, mas como elas estão presente em alguns trabalhos, manteve-as para não prejudicar o entendimento global do tema.

2.3.1.4 Resposta da QP4 - Quais das variáveis de otimização são utilizadas para restringir os resultados?

Esta questão busca descobrir como os processos de construções das rotas são restringidos. A restrição é importante porque os recursos são escassos. Por exemplo, é importante considerar o tempo que um usuário pode estar disposto a gastar para alcançar o seu destino. Já que construir uma rota grande com poucas transferências e que atenda uma grande demanda, pode resultar em um percurso com um tempo de viagem 5 vezes maior que o tempo aceitável pelo usuário.

Além do aspecto prejudicial ao usuário, existem situações vantajosas para o usuário mas que não são para o operador como, por exemplo, a criação de uma quantidade elevada de linhas. Apesar de ser interessante da perspectiva do usuário ter sua demanda atendida rapidamente, o custo operacional para o operador seria elevado. Dessa forma, essa configuração é inviável.

Por tanto, diante dos exemplos citados, as restrições são importantes para manter em equilíbrio desejos conflitantes. Logo, faz-se necessário gerar um entendimento acerca dessa questão. Por isso, a seguir são apresentadas as principais restrições aplicadas nos trabalhos estudados:

- **A rota não ser circular:** Restrição encontrada nos trabalhos de Fan and Mumford [2010], Kechagiopoulos and Beligiannis [2014] e Mumford [2013]. Ela impede que as rotas terminem no ponto de partida. Portanto, usa-se essa restrição quando não for permitido construir rotas circulares;
- **Conectividade da rede:** Garante que qualquer destino possa ser alcançado a partir de qualquer origem da rede de transporte [Fan and Mumford, 2010, Fan et al., 2009, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Mumford, 2013, Olivera et al., 2008, Xian et al., 2013];
- **Demanda não atendida mínima:** Esta restrição limita a demanda não atendida [Blum and Edsell, 2011, Fan et al., 2009, Mauttone and Urquhart, 2009, Owais et al., 2016]. Ou seja, ela garante que uma demanda mínima de viagens seja suprida pelos percursos. Destaca-se que o operador também pode ser prejudicado quando não a considera, pois ele pode deixar de atender passageiros pagantes;
- **Duração (tempo) máxima de uma rota:** Ela limita o tempo de viagem que um passageiro está disposto a aceitar [Fan et al., 2009, Owais et al., 2016]. A expectativa do usuário é responsável por ajustar essa restrição;
- **Extensão (comprimento) mínimo e máximo de uma rota:** Esta restringe o tamanho mínimo e máximo da rota, que deve ser aceitável para o operador [Chakraborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Curtin and Biba, 2011, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Hu et al., 2005, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Lei et al., 2016, Mo et al., 2008, Mumford, 2013, Pternea et al., 2015, Xiaowei et al., 2015, Yang et al., 2007]. Além também de considerar o percurso máximo

tolerado pelo usuário para alcançar o seu destino;

- **Frequência mínima e máxima do serviço:** Estabelece a periodicidade mínima e máxima do serviço para ser considerado aceitável pelos usuários e operadores de transporte [Cipriani et al., 2012, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Pinelli et al., 2016, Pternea et al., 2015, Szeto and Wu, 2011];
- **Quantidade mínima e máxima de veículos (tamanho da frota):** Limita o custo operacional e qualidade mínima do serviço [Blum and Edsell, 2011, Fan and Machemehl, 2008, Nikolic and Teodorovic, 2014, Szeto and Wu, 2011]. Muitos veículos eleva o custo de operação, já poucos o compromete porque vai ter menos transportes para operar as rotas;
- **Não possuir nós repetidos em uma rota:** Esta deve ser utilizada para garantir que não haja ciclos no percurso [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014, Szeto and Wu, 2011];
- **Quantidade máxima de transferências de rotas:** Indica a quantidade máxima de transferências tolerada pelos usuários do sistema de transporte [Blum and Edsell, 2011, Cancela et al., 2015, Fan et al., 2009, Olivera et al., 2008, Owais et al., 2016, Xiaowei et al., 2015]. A quantidade máxima preferida pelos trabalhos é duas transferências. Quando realizada mais do que essa quantidade, a demanda é considerada como não atendida;
- **Quantidade mínima e máxima de nós em uma rota:** Tem como objetivo limitar a quantidade de pontos de ônibus que uma rota deve percorrer [Chakroborty and Wivedi, 2002, Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014, Nikolic and Teodorovic, 2014, Szeto and Wu, 2011];
- **Quantidade mínima e máxima de passageiros transportados por uma rota:** Limita a quantidade de passageiros permitidos para serem transportados por uma linha de transporte [Cipriani et al., 2012, Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Flaut et al., 2008, Hu et al., 2005, Mo et al., 2008]. Para estimá-la, é necessário conhecer o limite máximo de passageiros comportados por um veículo de transporte público;
- **Quantidade mínima e máxima de rotas:** Esta restrição é importante da perspectiva do operador, pois um número grande de rotas implica um custo de operação elevado [Fan and Machemehl, 2008, Fan et al., 2013, Flaut et al., 2008, Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014, Kilic and Gok, 2014, Owais et al., 2016];
- **Quantidade de rotas que percorre uma aresta:** Funciona como mecanismo para impedir a sobrecarga de uma aresta com grande quantidade de rotas sobre ela [Lei et al., 2016, Mo et al., 2008];
- **Valor máximo da relação entre o tamanho da linha e o menor percurso entre a estação de origem e destino:** Restrição que estabelece uma relação entre o trajeto da rota e o menor percurso [Lei et al., 2016, Yang et al., 2007]. Ela

é útil para limitar relativamente o tamanho do percurso.

2.3.1.5 Resposta da QP5 - Quais são as técnicas/algoritmos de otimização utilizados?

Esta questão de pesquisa busca identificar os principais algoritmos para resolver o problema de otimização de percurso de transporte. Essa classe de problema é NP-*difícil*. Por isso, as abordagens analisadas preferiram algoritmos heurísticos e meta-heurísticos. Por fim, os principais identificados são os seguintes:

- **Algoritmo de Colônia de Formiga** [Hu et al., 2005, Lei et al., 2016, Martynova et al., 2015, Yang et al., 2007];
- **Algoritmo Genético** [Arbex and da Cunha, 2015, Bielli et al., 2002, Chakroborty, 2003, Chakroborty and Wivedi, 2002, Cipriani et al., 2012, Fan et al., 2009, 2013, Kiliç and Gök, 2015, Mumford, 2013, Nayeem et al., 2014, Olivera et al., 2008, Owais et al., 2016, Pternea et al., 2015, Szeto and Wu, 2011];
- **Algoritmo Guloso** [Zarrinmehr et al., 2016];
- **Busca tabu** [Fan and Machemehl, 2008];
- **Heurística** [Blum and Edsell, 2011, Cipriani et al., 2012, Curtin and Biba, 2011, Fan and Mumford, 2010, Fan et al., 2009, Fan and Machemehl, 2008, Flaut et al., 2008, Kilic and Gok, 2014, Kiliç and Gök, 2015, Mauttone and Urquhart, 2009, Mo et al., 2008, Mumford, 2013, Olivera et al., 2008, Pinelli et al., 2016, Xian et al., 2013];
- **Hill Climbing** [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014];
- **Otimização com Colônia de Abelha** [Nikolic and Teodorovic, 2013, 2014];
- **Otimização por Enxame de Partículas** [Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014];
- **Programação matemática (método analítico)** [Pternea et al., 2015].
- **Simulated Annealing** [Fan and Mumford, 2010, Kilic and Gok, 2014];

2.3.1.6 Resposta da QP6 - Quais são as principais contribuições da proposta?

As contribuições dos trabalhos foram variadas. Porém, as que se descaram foram a construção de novos algoritmos e a adaptação dos existentes. Essas preferências surgem porque os métodos convencionais possuem alto tempo de processamento. Dessa forma, os autores se esforçaram para construir técnicas aproximadas.

Alguns trabalhos usaram o algoritmo genético. Um deles foi o de Chakroborty [2003]. Ele ressaltou a dificuldade de resolver tais problemas com técnicas tradicionais. Também levantou indícios da eficiência dessa abordagem meta-heurística. Além disso, foram indicadas outras direções para futuras pesquisas resolverem problemas similares.

A proposta de Fan et al. [2009] introduziu um novo algoritmo de otimização evolucionária multi-objetivo denominado de *Simple Multi-Objective Optimization* (SMO). Além

disso, também propôs uma nova rotina para determinar movimentos mais adequados para a próxima solução.

Já Mumford [2013] desenvolveu uma nova heurística e um operador genético sofisticado para um *framework* evolucionário multi-objetivo denominado de *Simple Evolutionary Algorithm for Multi-Objective Optimization* (SEAMO) [Mumford, 2004, Valenzuela, 2002].

O trabalho de Szeto and Wu [2011] criou uma nova representação e um novo operador genético com o objetivo de gerar um algoritmo capaz de procurar a maior quantidade de possibilidades de percursos em um espaço de busca grande. Também desenvolveu um mecanismo para evitar o convergimento prematuro utilizando uma nova definição da distância de *hamming*.

O trabalho de Bielli et al. [2002] propôs um novo método para calcular o valor da função de aptidão (*fitness function*) do algoritmo genético. Esse trabalho se destacou também por validar sua abordagem com 4 redes de mais de 1000 nós. Entretanto, não comparou sua abordagem com outras da literatura.

O Nayeem et al. [2014] introduziu um novo modo de construção do algoritmo genético. Também construiu um gerador de rotas iniciais melhor que os da literatura.

A abordagem Arbex and da Cunha [2015] desenvolveu uma nova heurística para o algoritmo genético. O objetivo da otimização pode ser alternado ciclicamente ao longo das gerações dos percursos para melhor abordar a natureza multi-objetivo do TNDFSP.

Partindo para outras propostas que não utilizaram algoritmos genéticos, tem-se a abordagem de Olivera et al. [2008]. Ele apresentou uma técnica estocástica híbrida que combina eficientemente meta-heurísticas para resolver cooperativamente o TNDFSP.

O Mauttone and Urquhart [2009] propôs um novo método denominado de *Pair Insertion Algorithm* (PIA). Essa técnica foi desenvolvida a partir do algoritmo *Route Generation Algorithm* (RGA) [Baaq and Mahmassani, 1995]. O PIA e o RGA produzem soluções que beneficiam os usuários. Entretanto, o novo método também gera soluções mais vantajosas para os operadores. Observa-se que ele constrói percursos com tempos de viagens semelhantes ao RGA. Porém, o número de rotas produzidas é menor, implicando um menor percurso total. Uma desvantagem do PIA é tempo de processamento do algoritmo, que é maior que o do RGA.

A proposta de Yang et al. [2007] aplicou o algoritmo de colônia de formigas para a construção de rotas. A sua principal contribuição foi o desenvolvimento de uma nova estratégia de aumento de feromônio denominada de *Ant-Weight*. Tal recurso permite que a procura do caminho da formiga seja ajustada com base na função objetivo. Além disso, foi realizada a paralelização do algoritmo para melhorar o seu tempo de processamento.

Uma abordagem inovadora foi a de Blum and Edsell [2011]. Ele foi o único dos trabalhos analisados que considerou agentes inteligentes para resolver o problema de otimização de percursos.

A construção e adaptação de algoritmos foram as principais contribuições encontradas

nos trabalhos estudados. Além delas, a introdução de novos *benchmarks* para a comparação de resultados se destacou como contribuição relevante. O trabalho de Fan and Mumford [2010], Mumford [2013], Kechagiopoulos and Beligiannis [2014] e Kiliç and Gök [2015] tentaram tal objetivo. Além disso, o segundo se destacou por prover uma base de dados com dimensões realistas, diferente da base provida por Mandl [1980]. Já o último construiu sua base a partir de dados reais obtidos de cartões elétricos de viagens durante o período de um mês.

A abordagem de Kechagiopoulos and Beligiannis [2014] se diferenciou por realizar comparações com sete abordagens distintas através da base de Mandl [1980]. Além disso, vários elementos de conflitos (ou não) do projeto de rotas foram avaliados, parametrizados e ponderados separadamente.

Já o trabalho de Fan and Machemehl [2008] aplicou no processo de criação de rotas recomendações práticas de empresas de ônibus. Também desenvolveu um novo método para estimar a matriz de demanda. Além disso tudo, ele utilizou a busca tabu, a qual superou o algoritmo genético (não foi especificada a implementação).

Apenas o Cipriani et al. [2012] considerou o planejamento multi-modo. Ou seja, ele admitiu diferentes tipos de transporte público. Além das tradicionais linhas de ônibus, também incluiu o deslocamento através de trens. Como está contido dentro da classe TNDFSP, ele também resolveu o problema da frequência de operação dos serviços.

O Pinelli et al. [2016] introduziu um método totalmente baseado em dados obtidos a partir das redes de telefonia (antenas de celulares). Ele usou dados do deslocamento de 500.000 usuários durante um período de 5 meses. Além disso, ele estimou a matriz de demanda através de padrão de deslocamento extraídos desses dados.

A principal contribuição de Lei et al. [2016] foi a determinação da demanda de viagens através de dados de rastreamento de táxis (foram 12,455 táxis para sua construção).

A proposta de Pternea et al. [2015] otimizou rotas considerando ônibus convencionais e elétricos. Além disso, foi o único trabalho preocupado explicitamente com a emissão de poluentes na atmosfera. Também apresentou uma fórmula para calcular sua emissão.

O trabalho de Zarrinmehr et al. [2016] formulou o problema de otimização de percurso de transporte como um problema bi-nível multi-objetivo. Além disso, ele foi o único a propor um algoritmo guloso para essa classe de problema. Ele também aplicou um algoritmo eficiente para o problema de baixo nível (*traffic assignment problem*).

A proposta de Owais et al. [2016] teve como o principal foco identificar o conflito inerente entre os objetivos do TRNDP no processo de projeto de novas rotas. Já Cancela et al. [2015] discutiu aspectos relevantes nos modelos de programação matemática. Enquanto o Xiaowei et al. [2015] utilizou uma nova abordagem diferente das analisadas. Ele aplicou a teoria do prospecto cumulativa para projetar rotas de transporte.

Por fim, dentre todas contribuições, pode-se destacar principalmente a utilização de *benchmarks*. Esse recurso é muito importante porque facilita a comparação entre as

abordagens. De modo geral, pode-se resumir as contribuições dos trabalhos como: a introdução de novos algoritmos, adaptação de métodos existentes e introdução de novos *benchmarks* adequados aos cenários atuais. Todos trabalhos analisados afirmaram que sua solução era competitiva (considerando o marco temporal).

2.3.1.7 Resposta da QP7 - Quais foram as bases de dados testadas?

Essa questão de pesquisa busca entender as estruturas das redes utilizadas na validação das abordagens. Pontua-se, inicialmente, que a principal base de dados com esse propósito foi sugerida por Mandl [1980]. Dos 34 trabalhos analisados, 14 deles validaram com ela. A estrutura dessa rede contém 15 nós e 20 arestas. Sua demanda total de viagens é 15.570. Além disso, essa rede é introduzida no próprio trabalho do autor.

Apesar do *benchmark* provido por Mandl [1980] ser amplamente referenciado, a dimensão do grafo da sua rede é pequena. Tal dimensão está distante das redes reais das grandes cidades. Por exemplo, na cidade de Maceió/Alagoas/Brasil, o grafo da rede atual de transporte público possui mais que 1000 nós. Por isso, devido a pequena dimensão dessa base, alguns trabalhos criaram suas próprias redes de transporte como, por exemplo, a abordagem de Mumford [2013] que propôs quatro novas redes para validar sua abordagem. Nesse caso específico, o autor também teve a intenção de construir um novo *benchmark* para que outros trabalhos comparem seus resultados. Para isso, ele disponibilizou suas redes e matrizes de demanda.

Porém, a introdução de novas bases de dados para validação possui como desvantagens a pouca quantidade de trabalhos para a realização de comparações, já que elas são recentes. Normalmente, por conta disso, eles comparam seus resultados com um limite inferior ideal. Por exemplo, a proposta de Fan and Mumford [2010] além de comparar seus resultados com o *benchmark* de Mandl [1980], ela também aplicou sua nova técnica em mais três bases de dados. Porém, ele não comparou a efetividade de sua técnica com outros trabalhos nessas três novas bases.

Informações sobre as estruturas das redes identificadas nos trabalhos podem ser visualizada na Tabela 4. Ela contém a referência, o número de nós, arestas, demanda total e localidade (caso seja baseada em uma cidade real) das redes analisadas. As informações contidas na tabela são sobre as redes que serviram para validação dos trabalhos analisados. Por isso, algumas redes são extraídas de trabalhos que não foram analisados como a de Mandl [1980]. Também foi por isso que o campo de referência da tabela inclui a fonte da base de dados, e não do trabalho analisado que o referenciou. Logo, a quantidade de linhas na tabela pode ser maior ou menor que a quantidade de artigos estudados.

Tabela 4 – Redes de transportes analisadas

Fonte: Elaborado pelo autor

#	Referência	Núm. de nós	Núm. de arestas	Demanda total	Local
01	Mandl [1980]	15	20	15.570	Suíça 1980
02	Mumford [2013]	30	90	-	-
03	Mumford [2013]	70	210	-	Yubei - China
04	Mumford [2013]	110	385	-	Brighton, UK
05	Mumford [2013]	127	425	6.394.950	Cardiff, UK
06	Fan and Mumford [2010]	20	24	-	-
07	Fan and Mumford [2010]	50	65	-	-
08	Pattnaik et al. [1998]	8	9	-	-
09	Fan et al. [2009]	110	275	3.603.360	-
10	Nikolic and Teodorovic [2013]	110	275	-	-
11	Fan and Machemehl [2008]	160	418	-	-
12	Hu et al. [2005]	-	-	-	Changchun, China

Tabela 4 (Continua)

#	Referência	Número de nós	Número de arestas	Demanda total	Localidade
13	Olivera et al. [2008]	100	-	-	-
14	Mauttone and Urquhart [2009]	84	143	-	Cidade de Rivera, Uruguay
15	Yang et al. [2007]	17	29	-	-
16	Yang et al. [2007]	1.500	-	-	Dalian, China
17	Szeto and Wu [2011]	28	50	21.751	Tin Shui Wai, Hong Kong
18	Bielli et al. [2002]	1134	3016	-	[A] Parma, Italy
19	Bielli et al. [2002]	1075	2843	-	[A] Parma, Italy
10	Bielli et al. [2002]	1130	3006	-	[A] Parma, Italy
21	Bielli et al. [2002]	1092	2892	-	[A] Parma, Italy
22	Cipriani et al. [2012]	1300	7000	0	Roma, Italy
23	Curtin and Biba [2011]	-	-	-	Richardson, TX
24	Fan et al. [2013]	93	284	-	-

Tabela 4 (Continua)

#	Referência	Número de nós	Número de arestas	Demanda total	Localidade
25	Xian et al. [2013]	15	-	-	NUS
26	Pternea et al. [2015]	50	-	10.000	Heraklion, Crete
27	Cancela et al. [2015]	8	10	-	-
28	Wan and Lo [2003]	10	19	-	-
29	Kiliç and Gök [2015]	175	282	-	Adana, Turkey
30	Zarrinmehr et al. [2016]	24	-	-	Sioux Falls, South Dakota
31	Zarrinmehr et al. [2016]	933	2950	-	Chicago (Sketch), Illinois
32	Pinelli et al. [2016]	-	-	-	Abidjan, Ivory Coast
33	Lei et al. [2016]	-	-	-	Beijing, China
34	Xiaowei et al. [2015]	-	-	-	Xian, China
35	Martynova et al. [2015]	-	-	-	Tomsk, Russia

A partir da Tabela 4 pode-se concluir que é possível classificar as redes por sua dimensão. Foram identificadas três classes: redes que possuem até 99 nós; redes que possuem entre 100 e 999 nós; por fim, redes que possuem mais de 1000 nós. A primeira classe tem quinze redes, a segunda tem oito redes, e a terceira tem seis redes. Porém, não foi

possível identificar a estrutura da rede de seis trabalhos. Por fim, a Tabela 5 sintetiza essas informações declaradas.

Dimensão da rede	Quantidade de redes
Até 99 nós	15
Entre 100 e 999 nós	8
Acima de 1000 nós	6
Não identificadas	6
Total	35

Tabela 5 – Análise da dimensão da rede

Fonte: Elaborado pelo autor

Destaca-se que quatro das seis redes da terceira classe são referenciadas por apenas um trabalho. Portanto, apenas três trabalhos realizaram validações com redes que possuem a quantidade de nós acima de 1000. Esses trabalhos foram: Bielli et al. [2002], Yang et al. [2007] e Cipriani et al. [2012]. Como consequência, constata-se que trinta e um trabalhos não tiveram sua efetividade avaliada em bases de grandes dimensões. Ou seja, não há garantia da aplicabilidade dessas técnicas em redes dessa dimensão.

A Tabela 6 mostra a quantidade de redes e o número de trabalhos que foram validados com tal quantidade. Portanto, extrai-se que a maioria dos trabalhos foram validados com apenas uma rede.

Quantidade de redes	Quantidade de trabalhos
1	21
2	7
3	1
4	5

Tabela 6 – Estatística de quantidade de redes usadas para testar

Fonte: Elaborado pelo autor

Constata-se também que apenas cinco trabalhos avaliaram sua técnica com quatro redes. O primeiro, que é o Fan and Mumford [2010], que realizou sua validação apenas com redes com menos de 50 nós. O segundo Mumford [2013] aplicou duas redes com a quantidade de nós entre 100 e 130 e outras três com menos de 70 nós. O trabalho de Nayeem et al. [2014] avaliou sua abordagem com a base de Mandl [1980] e com três redes do trabalho de Mumford [2013]. Já o Cancela et al. [2015] incluiu uma rede própria, e as outras três foram das seguintes abordagens: Mandl [1980], Wan and Lo [2003] e Mauttone and Urquhart [2009]. Constata-se também que os dois primeiros trabalhos citados também incluíram na sua validação a rede de Mandl [1980]. Por fim, o trabalho de Bielli et al. [2002] avaliou sua abordagem com quatro redes com mais de 1000 nós.

Por fim, conclui-se que a maioria das validações realizadas pelos trabalhos desconsideraram redes com mais de 1000 nós. Por isso, é interessante direcionar os futuros trabalhos para considerarem validações com redes de grandes dimensões. Além disso, também é preciso aumentar a quantidade de redes testadas. Por último, pode-se afirmar que o entendimento da estrutura das redes estará contribuindo para construção da validação da presente proposta.

2.3.1.8 Resposta da QP8 - Quais métodos foram comparados com a proposta apresentada?

Essa questão de pesquisa busca entender como foi realizada a validação das propostas estudadas. No início da seção, a Tabela 2 mostra a quantidade de trabalhos comparados para validar cada uma das propostas selecionadas.

Já a Tabela 7 realiza uma análise estatística da quantidade de trabalhos comparados em cada validação das propostas estudadas. Para isso, ela relaciona o número de comparações com a quantidade de abordagens estudadas que consideraram tal valor. A primeira coluna é o número de comparações realizadas para validar um trabalho. Já a segunda coluna indica a quantidade de trabalhos analisados que validaram com a quantidade de propostas indicadas na primeira coluna.

Número de comparações	Quantidade de trabalhos
0	15
1	5
2	1
3	5
4	1
5	2
6	3
7	2

Tabela 7 – Estatística de quantidade propostas comparadas para validação

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da análise da Tabela 7, depreende-se que 15 (quinze) trabalhos não foram comparados com nenhuma outra abordagem da literatura. A validação deles consistiu apenas em realizar um caso de estudo, que pode usar uma ou mais redes de diferentes estruturas. Para avaliar a efetividade de seus resultados, essas propostas comparam seus resultados com um limite inferior previamente estabelecido. Esse limite pode ser determinado, por exemplo, através do menor percurso entre o nó inicial e final de uma linha.

Os trabalhos que realizaram comparações com outras técnicas escolheram redes conhecidas e disponíveis para sua validação, já que tais redes possuem resultados de muitos trabalhos que a usaram anteriormente. Dessa forma, a comparação é direta, já que eles só precisam extrair os resultados obtidos por diferentes abordagens nessas redes. A rede

de Mandl [1980] foi a principal referência para esse propósito. Porém, mais recentemente, o Mumford [2013] propôs um novo conjunto de redes para servir como um novo marco de comparações entre trabalhos.

Por exemplo, a abordagem de Kilic and Gok [2014] comparou seu trabalho com quatro abordagens utilizando cinco redes. Uma rede foi a de Mandl [1980] e as outras quatro foram introduzidas por Mumford [2013]. Os resultados obtidos com a primeira rede foram comparados com outras três abordagens. Já as outras quatro foram comparadas apenas com o próprio proponente da rede. No final, a proposta demonstrou melhor desempenho nessas redes.

Porém, o Kilic and Gok [2014] não considera o *benchmark* de Mandl [1980] adequado para estimar a efetividade de técnicas de otimização de percurso, pois ela é uma rede pequena e antiga. Mesmo com tais desvantagens, segundo Kechagiopoulos and Beligiannis [2014], essa base é provavelmente o *benchmark* mais investigado e aceito na literatura relevante.

Devido a presença na maioria dos trabalhos analisados, serão dados mais alguns detalhes sobre a base de Mandl [1980]. Destaca-se inicialmente que os trabalhos que a referenciam precisam construir quatro sistemas de transporte diferentes com quatro, seis, sete e oito rotas. A partir de cada um desses cenários, a comparação dos resultados pode ser realizada entre os resultados da proposta e os extraídos da literatura. Para realizar essas comparações, algumas medidas precisam ser definidas. Apesar de existir muitas métricas para avaliar um sistema de transporte, o Mandl [1980] considerou as seguintes como representativas para avaliação de um sistema:

- d^0 : Essa medida representa a porcentagem de demanda satisfeita sem nenhuma transferência;
- d^1 : Ela indica a porcentagem da demanda satisfeita com uma transferência;
- d^2 : É a porcentagem de demanda satisfeita com duas transferências;
- d^{un} : Apresenta a porcentagem de demanda não satisfeita;
- **ATT**: O tempo médio de viagem em minutos por usuário (*Average travel time in minutes per transit user - mpu*). Essa variável inclui tempo de transferência (os trabalhos analisados consideram que é 5 minutos por transferência).

A maioria dos trabalhos que realizaram comparações utilizaram esse *benchmark*. Essa preferência possivelmente surge devido aos resultados de muitos trabalhos sobre ela e também por sua estrutura de métricas bem definida. Esses dois motivos facilitam a comparação de um novo método com outros. Destaca-se também que foram poucos os trabalhos que não validaram sua técnica com essa base (considerando aqueles que realizaram comparações com outras abordagens).

Muitos dos trabalhos analisados, apesar de validarem suas soluções com Mandl [1980], testaram suas abordagens com redes diferente. Porém, nesses casos, não há comparação com outros métodos. Devido isso, os algoritmos são avaliados através de um limite inferior estabelecido. Por exemplo, o trabalho de Mumford [2013] também avaliou sua técnica com bases de dados próprias. Porém, nessa proposta o limite foi calculado através do menor percurso entre dois pontos, sem considerar transferências.

Como já explicado, alguns trabalhos não realizaram comparações com qualquer outra abordagem. O trabalho de Szeto and Wu [2011] é um exemplo dessa situação. A sua única validação foi comparar sua abordagem com um método sequencial baseado no seu próprio método.

O trabalho de Cipriani et al. [2012] se destacou por realizar uma comparação entre o transporte público corrente atual e o resultado obtido com seu proposta. Entretanto, ele não realizou comparação com outras abordagens da literatura. O experimento realizado por ele destacou que a demanda foi atendida efetivamente (reduzindo 30% do tempo de espera). A nova rede construída estava composta por um menor número de linhas (a redução foi de 50%). E por fim, ainda obtive uma resultado mais eficiente (diminuindo em 20% o custo operacional). Além disso tudo, ele conseguiu garantir a mesma área de cobertura do sistema corrente.

Por fim, para concluir a resposta dessa questão de pesquisa, algumas ponderações podem ser feitas. Observou-se que a validação dos trabalhos analisados realizaram poucas comparações com outras propostas. Eles geralmente empregam o *benchmark* de Mandl [1980] para esse propósito, apesar de ser uma rede pequena e antiga. Além disso, poucos trabalhos realizaram comparações com redes recentes. Constatou-se também que para validar os trabalhos que criavam suas próprias redes, eles estabeleceram um limite inferior para comparação. Por fim, o único trabalho que apresentou comparação explícita com sistema corrente de transporte foi o proposto por Cipriani et al. [2012].

2.3.1.9 Resposta da QP9 - A abordagem foi aplicada em dados de sistemas de transporte reais?

Essa questão de pesquisa é derivado da **QP7**. Porém, não se preocupou apenas em entender sobre as estruturas das redes. O seu principal objetivo é avaliar a aplicabilidade das abordagens em redes reais de transporte. Por exemplo, a partir da pesquisa, constatou-se que dezesseis (16) trabalhos não utilizaram redes reais para validação. Enquanto, dezoito (18) consideraram.

Antes de continuar, faz-se necessário relatar uma diretiva. Devido a base de Mandl [1980] possuir uma dimensão muito pequena, ela não foi admitida como um sistema de transporte real. Logo, os trabalhos que somente a consideraram para validação não foram incluídos nesta análise.

Apesar de ser considerável o número de trabalhos que validaram com sistemas de transporte reais, há necessidade de entender esses dezoito (18) trabalhos. Desses, oito (8)

validaram seus trabalhos com redes reais com menos de 200 nós. Já seis (6) trabalhos não apresentam a dimensão da rede, dificultando o entendimento da sua aplicabilidade. Por fim, somente quatro (4) trabalhos apresentam redes com mais de 1000 nós. A seguir será dada uma explicação sobre (pelo menos) um caso de cada tipo dessas redes elencadas.

O trabalho de Mumford [2013] apresenta três redes reais. Ele usou dados das seguintes cidades: *Yubei/China*; *Brighton/UK* e *Cardiff/UK*. Entretanto apesar de ter usado três cidades, todas elas possuem menos de 200 nós. E nesse presente trabalho essa dimensão é considerada pequena, já que a cidade de Maceió/Alagoas/Brasil possui mais de 1000 nós. Além disso Maceió² contém 1.013.773 habitantes e possui uma área de 510.655km^2 . Enquanto em *Brighton/UK*³ (uma das bases de dados acima), possui 155.919 habitantes e uma área de 111.84km^2 . A partir desses dados fica claro a relação entre a dimensão dessas redes. Logo, a pesar de ser uma rede real, não se pode saber a princípio se a proposta de Mumford [2013] pode ser aplicada em redes com mais de 1000 nós.

O trabalho de Hu et al. [2005] validou seu trabalho em cima da rede de *Changchun/China*. Entretanto ele não apresentou a estrutura da rede. Por isso, há dificuldade em obter um entendimento sobre quais tipos de redes a proposta pode ser aplicada. Além desse trabalho, o trabalho de Curtin and Biba [2011] não apresentou a estrutura de rede também. A cidade que esse aplicou seu método foi a *Richardson/Texa/EUA*.

Para finalizar, apenas três trabalhos aplicaram seus métodos em redes reais de transporte com mais de 1000 nós. O trabalho de Yang et al. [2007] validou sua abordagem com uma rede de 1500 nós extraída da cidade de *Dalian/China*. Já o trabalho de Cipriani et al. [2012] validou seu trabalho com uma rede de 1300 nós da cidade de Roma/Itália. O último, que é de Bielli et al. [2002], utilizou quatro redes baseadas na cidade de Parma/Itália. Essas redes possuem entre 1000 e 1200 nós.

A partir dessa questão de pesquisa e da questão **QP7** é possível traçar um perfil acerca da aplicabilidade de cada método. É possível também gerar um divisor de abordagens com relação a dimensão e a possibilidade de aplicação em rede de transportes reais.

2.3.1.10 Resposta da QP10 - Os resultados obtidos com a abordagem foram implantados na cidade onde foi executado o método de otimização?

Das dezoito (18) propostas que aplicaram seu método em bases de dados reais, nenhum deles efetivamente implantaram os resultados obtidos no sistema de transporte público urbano da cidade estudada.

O trabalho de Cipriani et al. [2012] foi o único que comparou suas rotas finais com as existentes. Além disso, garantiu a mesma área de cobertura do sistema corrente. Entretanto, não foram apresentados meios de tornar viável sua implantação na cidade de Roma/Itália.

² <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Maceió>>. Acessado em: 31/07/2017

³ <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Brighton>>. Acessado em: 31/07/2017

2.3.1.11 Resposta da QP11 - A abordagem de otimização de percurso de transporte considera o desenho do percurso existente ou o desconsidera?

Nenhum dos trabalhos analisados considerou o transporte público existente. Entretanto, o Curtin and Biba [2011] comentou sobre a dificuldade de implantar os resultados de forma instantânea.

3 ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO INCREMENTAL DE PERCURSO DE TRANSPORTE PÚBLICO

A presente seção visa explicar o novo método de otimização. Para isso, foi dividida em algumas seções. A Seção 3.1 irá expor os conceitos fundamentais do algoritmo. Já a Seção 3.2 tenta justificar as escolhas de projeto da solução, focando naquelas mais importantes. Por fim, as Seções 3.3 e 3.4 descrevem detalhadamente a abordagem. A primeira introduz a função objetivo escolhida e informações complementares. Já a segunda descreve o algoritmo incremental.

3.1 Visão geral

O algoritmo recebe como entrada as rotas iniciais ou bases. Uma execução dele é nomeada de iteração, uma vez que pode ser executado várias vezes. Para isso, somente é necessário passar os últimos percursos construídos como entrada. Já um resultado são as rotas modificadas semelhantes às bases. Em razão disso, devem ser colocadas em operação antes da próxima iteração, uma vez que já possuem certo grau de diferença.

A Figura 5 ilustra esse processo. No extremo esquerdo, a elipse indica as rotas conhecidas pelos usuários. Já os retângulos posteriores são os resultados das iterações, ou seja, são os novos percursos. Enquanto as setas que conectam as figuras geométricas posteriores às anteriores indicam o grau de semelhança entre as versões do sistema. Ressalta-se novamente que o resultado de cada iteração deve ser colocado em operação antes do próximo para evitar transtornos aos usuários.

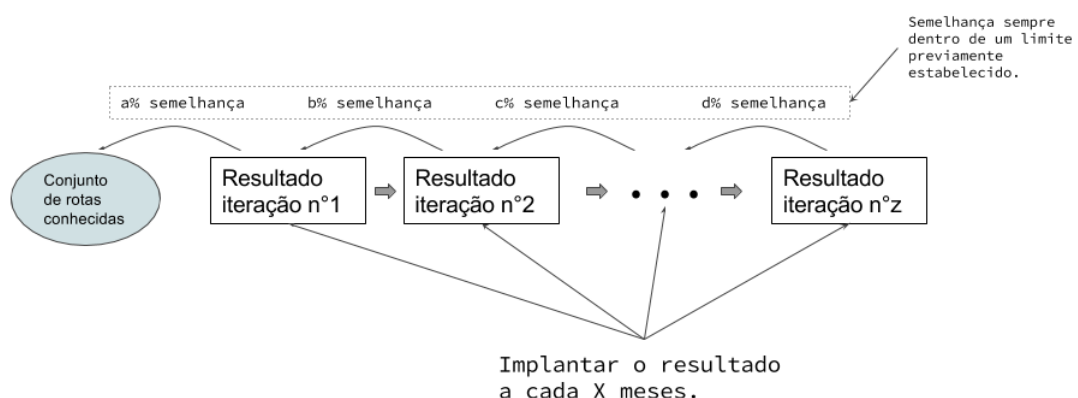


Figura 5 – Esboço da solução proposta

Fonte: Elaborado pelo autor

Para manter o grau de semelhança entre os resultados, não devem ser violadas as seguintes restrições:

- **Taxa mínima de semelhança R_{min} :** Ela limita a diferença entre o percurso base e o novo. Essa diferença é medida pela quantidade de nós semelhantes. Por exemplo, o operador pode estabelecer que 80% da estrutura das rotas bases não sejam alteradas. Dessa forma, o resultado terá obrigatoriamente um nível de semelhança igual ou superior a esse com os percursos bases;
- **Taxa máxima de aumento do percurso I_{max} :** Essa medida serve para indicar o tamanho máximo de um percurso. Porém, ela é uma métrica relativa dependente do percurso base.

Já para avaliar a qualidade dos resultados é preciso escolher uma métrica para selecionar os melhores percursos. Sendo assim, o presente trabalho escolheu a seguinte:

- **Densidade de viajantes diretos D :** Essa métrica indica a quantidade de viajantes diretos por quilômetro. Dessa forma, é possível construir sistemas mais econômicos e eficientes. Portanto, o custo do operador reduz além de diminuir o número de transferências de linhas dos usuários.

Por fim, foram criadas três seções de exemplos de aplicação dessa nova abordagem para reforçar o entendimento da otimização incremental. A Seção 3.1.1 apresenta um exemplo de aplicação do algoritmo em uma rota de transporte. Já a Seção 3.1.2 ilustra um exemplo considerando um sistema de transporte completo. Enquanto a Seção 3.1.3 exemplifica as vantagens da restrição taxa mínima de semelhança R_{min} e as da taxa máxima de aumento I_{max} . Por último, observa-se que essas seções utilizaram a rede introduzida por Mandl [1980], uma vez que muitos trabalhos a referenciam. Ela está descrita detalhadamente na Seção 4. Além disso, o seu grafo pode ser visualizado na Figura 14.

3.1.1 Exemplo de otimização incremental de uma rota

O exemplo focará apenas em uma iteração e um percurso base l formado pelos nós (0, 3, 5, 7) ilustrados no lado esquerdo da Figura 6. Além disso, o algoritmo deverá manter no mínimo três nós iguais ($R_{min} = 3$). Após a sua execução, algumas modificações são geradas. Os seus tipos podem ser inclusão ou remoção de nós. Como resultado possível, pode-se obter a rota l' constituída pelos nós (0, 1, 4, 3, 5, 14, 7), e que está sendo desenhada do lado direito. Por fim, ela possui três nós semelhantes e dois diferentes da base.

Observa-se que essas pequenas modificações devem gerar rotas mais atrativas. Dessa forma, a nova linha l' possui uma densidade D maior que a l . Já as modificações nos percursos bases devem ser limitados pela restrição R_{min} e I_{max} , cujos valores são definidos previamente por um planejador.

3.1.2 Exemplo de otimização incremental de um sistema de transporte

Esse exemplo focará na otimização das quatro rotas bases listadas a seguir:

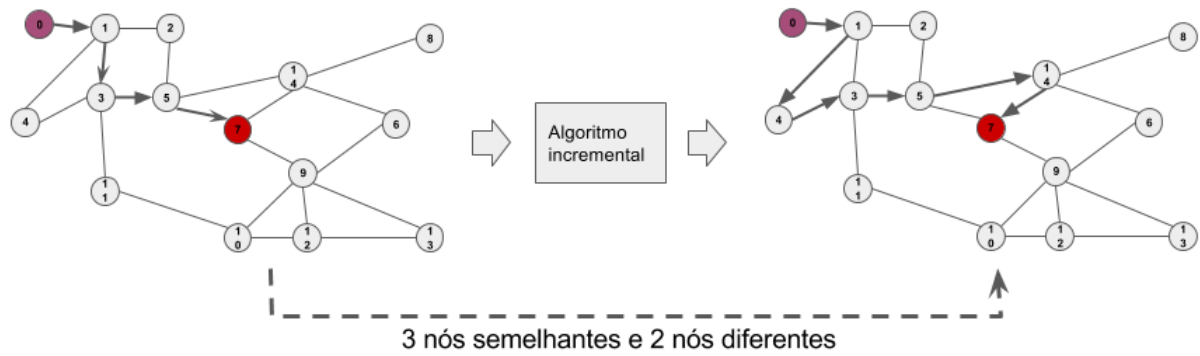


Figura 6 – Exemplo do algoritmo incremental considerando uma rota

Fonte: Elaborado pelo autor

0 - 1 - 3 - 5 - 7

1 - 3 - 11 - 10 - 12 - 9

3 - 11 - 10 - 12 - 13

4 - 1 - 3 - 11 - 10 - 12

Esses percursos foram intitulados de versão $v0$ do sistema, já que ainda não estão otimizados. Porém, após a primeira iteração, o seu nome muda para $v1$, e assim por diante. Por fim, também é importante escolher as medidas de mensuração de qualidade, já que são utilizadas pelo algoritmo para escolher a melhor rota. As escolhidas para esse exemplo foram as seguintes:

Densidade de viajantes diretos D

Tempo de viagem dos percursos TT

Percentual de viajantes que não realizam transferências d^0

Taxa de semelhança R

A Tabela 8 ilustra os resultados. As colunas indicam as versões do sistema, as quais foram poucas por simplificação. Cada uma delas possui semelhança com a anterior, bastando verificar a quantidade de nós comuns. As modificações nas rotas incluiu diminuição, crescimento ou estabilização dos seus tamanhos com o objetivo de torná-las mais atrativas e sujeitando-as a manter em média três nós semelhantes.

Já a Tabela 9 ilustra os valores das medidas escolhidas para os resultados. A primeira coluna é o rótulo da versão. Já as outras são as medidas D , TT , d^0 e R . Porém, elas estão sendo mensuradas considerando 4 rotas, e não individualmente. Os resultados obtidos mostram que os percursos melhoram a cada execução do algoritmo, mesmo com a taxa de semelhança circundando entre 75% e 90%. Sendo, portanto, um aspecto vantajoso, uma vez que a qualidade evoluiu mantendo um grau de semelhança adequado.

v0	v1	v2
0 - 1 - 3 - 5 - 7	⇒ 0 - 1 - 2 - 5 - 7	⇒ 0 - 1 - 2 - 5 - 7
1 - 3 - 11 - 10 - 12 - 9	⇒ 1 - 3 - 11 - 10 - 12 - 13 - 9	⇒ 1 - 3 - 5 - 7 - 9
3 - 11 - 10 - 12 - 13	⇒ 3 - 11 - 10 - 12 - 13	⇒ 3 - 11 - 10 - 12 - 13
4 - 1 - 3 - 11 - 10 - 12	⇒ 4 - 3 - 11 - 10 - 12	⇒ 4 - 3 - 11 - 10 - 9 - 13 - 12

Tabela 8 – Exemplo do algoritmo incremental considerando quatro rotas

Fonte: Elaborado pelo autor

Versão	d^0	D	TT	R
Versão 0	45.92	73.97	116.00	-
Versão 1	52.28	89.61	109.00	87.26
Versão 2	72.13	137.51	98.00	78.57

Tabela 9 – Valores das métricas dos cenários da Tabela 8

Por fim, a Figura 7 ilustra graficamente a melhoria progressiva deles. No primeiro gráfico é exposta a demanda atendida sem transferências d^0 , e o segundo é a densidade de viajantes diretos por unidade de distância D .

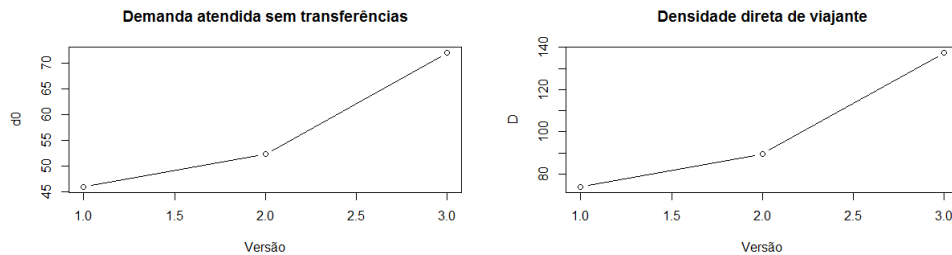


Figura 7 – Evolução dos cenários da Tabela 8

Fonte: Elaborado pelo autor

3.1.3 Exemplo de aplicação da restrição R_{min} e I_{max}

A explicação dessas restrições está dividida em duas partes. A primeira abordará a influência da restrição taxa máxima de aumento I_{max} na construção de um percurso. Já a segunda irá explicar esse processo, mas considerando a taxa mínima de semelhança R_{min} . Por fim, as duas partes enfatizaram principalmente como elas diminuem espaço de busca do algoritmo.

O exemplo utiliza o primeiro percurso do cenário exposto na Seção 3.1.2, que será nomeado de l . Ele e o tempo de viagem de cada aresta estão plotados na Figura 8. Porém, no segundo exemplo, o tempo de viagem da aresta (14, 6) e da (6, 9) serão alterados para o valor 1. Ou seja, a travessia nelas custará apenas um minuto. Essa modificação objetivou tornar mais didática a explicação.

O fluxo de execução da primeira parte pode ser visualizado na Figura 9, cujo objetivo do algoritmo é encontrar o caminho entre o nó origem 0 e o destino 7, considerando o percurso base l . Na figura, o retângulo laranja no extremo inferior esquerdo indica qual passo está sendo executado. Já a seta verde marca o nó corrente que está sendo analisado. Por fim, esse cenário foi executado com a taxa máximo de crescimento I_{max} com o seguinte valor:

$I_{max} = 30\%$. Ou seja, o tempo de viagem não poderá ultrapassar a duração de 22,1 minutos, já que o percurso base tem duração de 17 minutos.

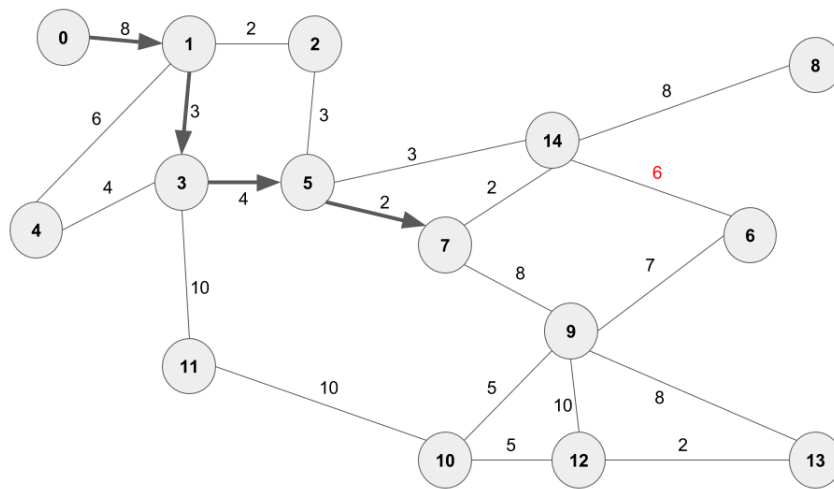


Figura 8 – Rota para explicação da restrição R_{min} e I_{max}

Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo começa no nó de origem 0 (**passo 1**). Nesta situação, só há um caminho possível. Por isso, o próximo nó escolhido é o 1 (**passo 2**). Já o nó 1 está conectado a outros três. Sendo assim, o algoritmo selecionou de modo aleatório o nó 4 (**passo 3**). Portanto, a próxima decisão será a partir dele. Entretanto, como não é possível retroceder, só existe uma opção válida, que é o nó 3 (**passo 4**).

No nó 3 o algoritmo escolhe aleatoriamente o 11. Entretanto, a restrição I_{max} é violada, já que o percurso construído até esse ponto tem 28 minutos ($28min > I_{max} = 22.1min$). Portanto, a escolha do nó 11 é cancelada e marcada como inviável (**passo 5**). As próximas buscas realizadas não irão repetir esse caminho. Isso está sendo representado por um \times sobre a aresta e nos passos seguintes a aresta fica pontilhada.

Como o nó corrente continua sendo o nó 3, ainda é preciso escolher o próximo. O único caminho possível é através do vértice 5 (**passo 6**). Após isso, é escolhido aleatoriamente o nó 14 (**passo 7**), já que ele não viola nenhuma restrição. A próxima escolha aleatória iria ser o nó 6. Entretanto ela viola a restrição, já que a duração da viagem atinge os 23 minutos. Como no caso anterior, a conexão que os une é marcada como inviável (**passo**

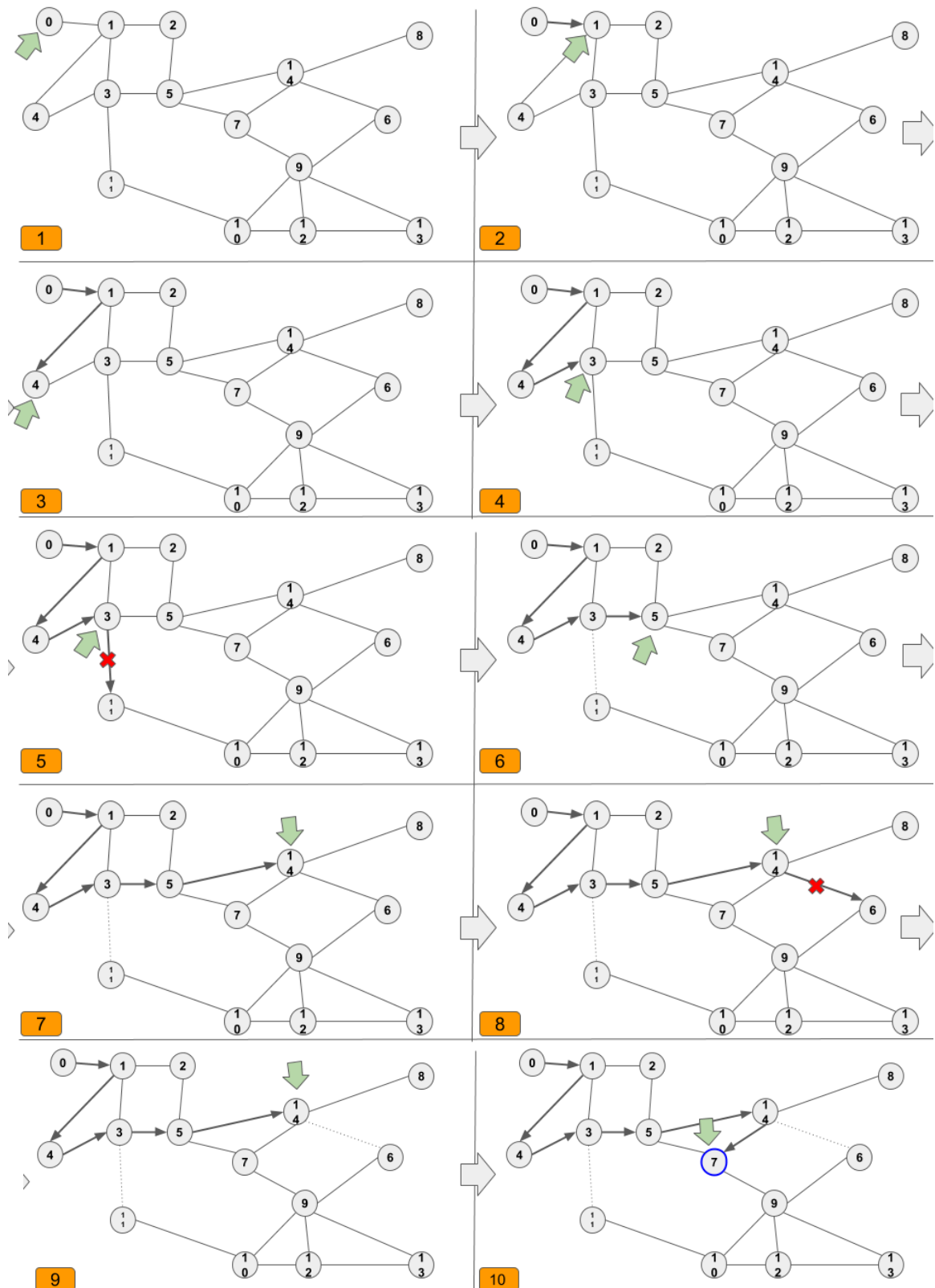


Figura 9 – Fluxo de execução do exemplo considerando a restrição I_{max}

Fonte: Elaborado pelo autor

8). Dessa forma, o algoritmo ainda continua no nó 14 (**passo 9**). Por fim, o nó destino

7 é alcançado (**passo 10**). Onde, o tamanho do percurso final é de 20 minutos, e está dentro dos limites impostos pela restrição I_{max} .

A redução do espaço de busca pode ser percebida a partir desse exemplo, uma vez que futuras buscas iram desconsiderar as arestas excluídas. Ou seja, através dessa restrição, o tempo de processamento do algoritmo é reduzido. Já uma combinação entre ela e a taxa mínima de semelhança R_{min} também possibilita diminuir consideravelmente o tempo de execução, considerando a natureza gulosa dessa abordagem. Por isso, elas são extremamente importantes, além de cumprir o papel de limitar as modificações do sistema.

O fluxo de execução do algoritmo da segunda parte pode ser visualizado na Figura 10. Porém, antes de continuar com a explicação, é preciso definir o valor da taxa máxima de semelhança R_{max} como:

- $R_{max} = 80\%$. Dessa forma, o número de nós diferentes admitidos é 3. Esse valor é obtido a partir dessa restrição e também da taxa máxima de crescimento I_{max} . Porém, por questões de simplicidade, o correto cálculo dela somente será exposto na Seção 3.4.

O exemplo continua a partir do nó 6 (**passo 9.1**). Tal vértice somente tem o nó 9 como uma escolha possível. Porém, a interseção entre o percurso até ele e o l resulta em 4 nós diferentes (um a mais do permitido). Portanto, a conexão entre eles é marcada como inviável (**passo 10.1**). Além disso, como o nó 6 não pode alcançar mais nenhum outro, é necessário retroceder o algoritmo para o nó 14 e também marcar a aresta entre eles como inviável (**passo 11.1**). A partir desse último nó, o algoritmo escolhe o 8 (**passo 12.1**). Entretanto, como ele não possui nenhum nó adjacente, ele retrocede e retornar novamente para o 14 (**passo 13.1**). Dessa forma, a única escolha possível é o 7. Logo, o algoritmo atinge o destino e encerra a execução (**passo 14.1**).

Por fim, cada iteração (execução) do algoritmo precisa gerar todas possibilidades de percursos entre a origem e destino para selecionar o melhor, uma vez que ele usa uma abordagem gulosa. Esses dois exemplos consideram apenas a construção de um caminho, no cenário real ele precisaria construir muitos. Portanto, um mecanismo que diminua o espaço de busca é vital. A restrição I_{max} e R_{min} também auxiliam nessa tarefa, além garantir a construção de percursos considerando os padrões de viagens. Logo, elas desempenha um papel imprescindível nessa abordagem.

3.2 Decisões de projeto da abordagem

O fluxo de ações para criar uma nova abordagem para projetar percursos de transporte público geralmente consiste em escolher uma função objetivo, as restrições operacionais e o algoritmo. Sendo assim, as escolhas influenciadoras do resultado final dessa abordagem são justificadas nessa seção.

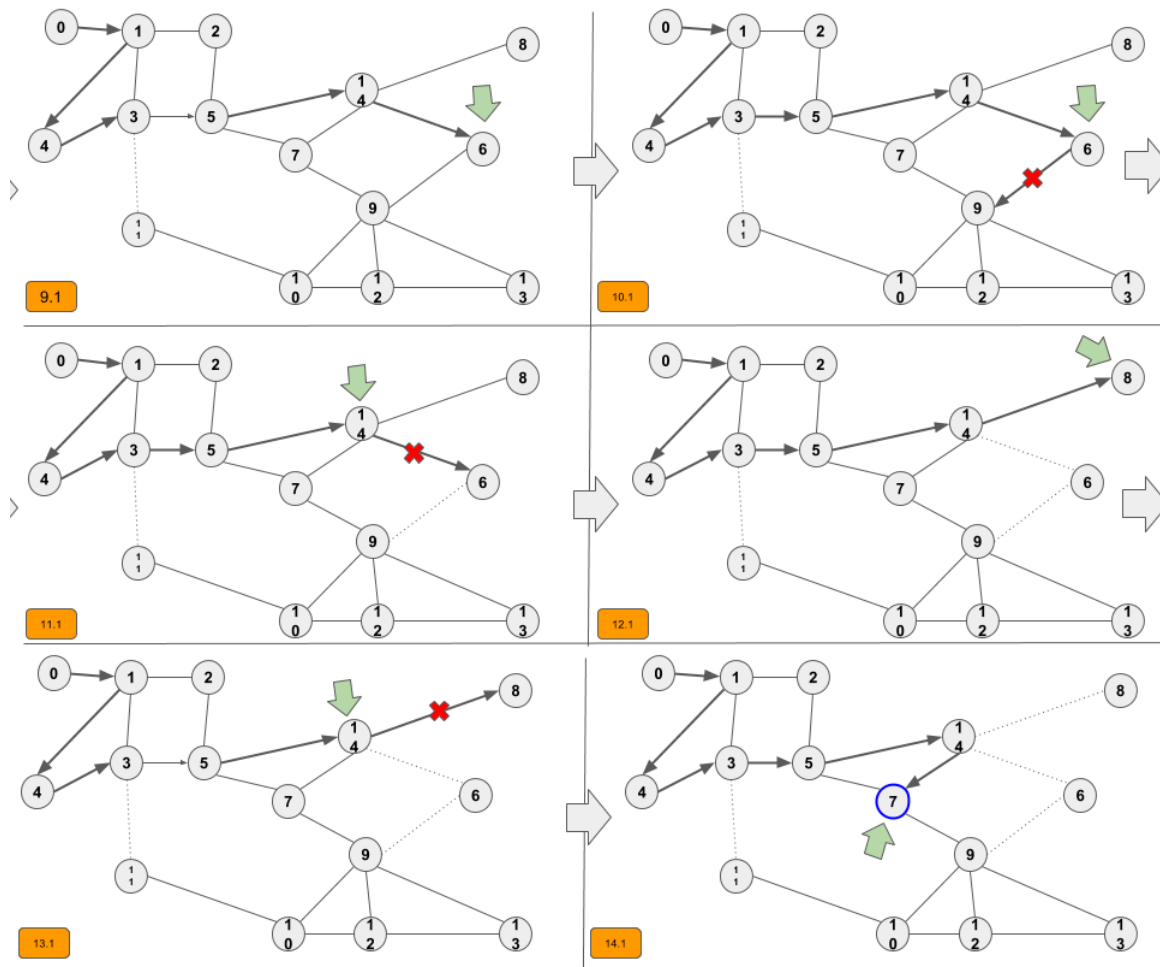


Figura 10 – Fluxo de execução do exemplo considerando a restrição R_{min}

Fonte: Elaborado pelo autor

A densidade de viajante diretos D foi escolhida como função objetivo para o novo algoritmo incremental. Ela permite aumentar a quantidade de passageiros diretos por quilômetro [Lei et al., 2016, Martynova et al., 2015, Mo et al., 2008, Yang et al., 2007]. Os viajantes diretos são aqueles que não precisam realizar transferências (ou seja, mudança de rota) para alcançar os destinos pretendidos. Além disso, tal função permite simplificar o cálculo da quantidade de passageiros transportados pelas rotas, já que evita a necessidade de modelar o problema de nível inferior (ver Apêndice B). Outra vantagem do aumento da densidade direta, segundo o Mo et al. [2008], é a construção de um sistema mais econômico e eficiente. Dessa forma, o custo do operador reduz além de diminuir o número de transferências dos usuários.

Algumas abordagens consideram apenas a maximização da quantidade de viajantes diretos [Hu et al., 2005, Pinelli et al., 2016]. Entretanto, implica a construção de percursos grandes. Portanto, não é vantajoso para o operador, uma vez que aumenta o custo de operação do serviço. Enquanto a redução da quantidade de transferências beneficia os usuários. Outros trabalhos consideram somente o tempo de deslocamento na função

objetivo. Sendo assim, eles precisam estimar a velocidade dos veículos em cada aresta da rede. Porém, nem sempre é possível descobrir tais valores. Logo, ruídos prejudiciais podem ser introduzidos durante a construção dos novos percursos.

A função objetivo escolhida está sujeita a algumas restrições. Duas delas já foram introduzidas na Seção 3.1, as quais são a **taxa mínima de semelhança** R_{min} e a **taxa máxima de crescimento** I_{max} . As outras restrições são listadas a seguir:

1. **Não possuir nós repetidos em uma rota;**
2. **Quantidade mínima e máxima de nós em uma rota;**
3. **Extensão (comprimento) mínimo e máximo de uma rota;**
4. **Quantidade mínima e máxima de passageiros transportados por uma rota;**
5. **A rota não ser circular;**
6. **Valor máximo da relação entre o tamanho da rota e o menor percurso entre a estação de origem e destino.**

A primeira restrição não permite que um nó seja inserido mais de duas vezes na mesma linha. A segunda e a terceira restrição buscam limitar o tamanho do percurso. Já a quarta restrição serve para manter a comodidade dos passageiros, uma vez que não é interessante veículos lotados. Um fator influenciador dessa restrição é a frequência do serviço, porém não é abordada neste trabalho. A penúltima restrição impede a construção de percursos circulares. Por fim, a última restrição é complementar a segunda e a terceira. Porém, ela permite limitar o tamanho da rota, mas de modo relativo com base no menor percurso entre a origem e o destino. Essa última pode impactar no desempenho da técnica, já que é preciso computar o menor caminho entre duas paradas.

As restrições **Frequência mínima e máxima do serviço**, **Quantidade mínima e máxima de veículos (tamanho da frota)** e **Quantidade de rotas que percorre uma aresta** não foram incluídas porque a presente abordagem não considera a frequência de operação dos serviços durante otimização. Além disso, ressalta-se que a quantidade de veículos necessários para um sistema é determinada por tal informação.

A restrição **Quantidade mínima e máxima de rotas** não precisa ser considerada, já que o algoritmo incremental descobre a quantidade de percursos através dos existentes. Dessa forma, esse valor já é estabelecido previamente. Já a **Duração (tempo) máxima de uma rota** não foi adotada também, uma vez que não está sendo considerada a velocidade dos veículos. Enquanto a **Quantidade máxima de transferências de rotas**, a **Demanda não atendida mínima** e a **Conectividade da rede** não foram incluídas devido à natureza da função objetivo escolhida, que implicitamente já está diminuindo a quantidade de transferências dos passageiros e a demanda não atendida. Conseqüentemente, a conectividade da rede aumenta.

Por fim, o algoritmo escolhido projeta as rotas maximizando a densidade de viajante diretos, além de estarem sujeitas as restrições operacionais listadas. Para isso, uma estra-

tégia de busca gulosa é utilizada. Sendo a restrições R_{min} e I_{max} responsável por torná-la viável, já que limitam os espaço de busca. Consequentemente, reduz o tempo de processamento. Além disso, isso somente foi possível por causa da sua natureza incremental.

3.3 Função objetivo

A presente seção tem o objetivo de explicar em detalhes a função objetivo **Maximizar a quantidade de passageiros diretos por unidade de espaço**. Para isso, essa seção foi dividida em quatro partes. A Seção 3.3.1 formaliza o que é um sistema de transporte. Já Seção 3.3.2 descreve as suas variáveis. Enquanto a Seção 3.3.3 introduz e explica as restrições operacionais que está sujeita. Por fim, a Seção 3.4 descreve matematicamente o modelo de otimização de densidade de viajantes diretos D .

3.3.1 Sistema de transporte

Um sistema de transporte público (no contexto desse trabalho) é constituído por uma rede e um conjunto de linhas. O primeiro é formalmente definido como um grafo direcionado $G = (V, E)$, onde V é o conjunto de vértices e E é o conjunto de arestas. Estes dois últimos possuem a seguinte forma: $V = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ e $E = (e_1, e_2, \dots, e_n)$. Sendo um vértice v_x compreendido como um ponto de ônibus ou um acesso para embarque e desembarque de pedestres. Já uma aresta e_x é uma sequência de dois vértices adjacentes, e semanticamente é um segmento de rua que liga dois pontos. Esta é descrita como: $e_x = (v_i, v_j)$, tal que $v_i, v_j \in V$.

O segundo componente do sistema são as linhas, as quais são definidas como uma sequência de nós ou arestas. Formalmente, $l_x = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ ou $l_x = (e_1, e_2, \dots, e_n)$. Nessa última opção, é preciso verificar se o nó destino da aresta precedente é o nó origem da posterior. Já o conjunto de todas linhas é definido como $L = (l_1, l_2, \dots, l_n)$. Por fim, um sistema de transporte pode ser representado da seguinte forma:

$$PT = (G, L) \quad (3.1)$$

Outro elemento fundamental é a matriz de demanda SP . Formalmente, uma demanda de viagem entre dois nós é definida como SP_{ij} , onde i e j são vértices do grafo G . A partir dessa estrutura, a previsão da quantidade de viajantes transportados por uma rota pode ser obtida. Entretanto, nem todos trabalhos a consideram.

3.3.2 Variáveis

A função objetivo é formada por várias variáveis. Algumas são usadas diretamente, e outras somente pelas restrições. Entretanto, todas são imprescindível para o seu correto cálculo. Antes de descrevê-las, é preciso conhecer os seguintes termos:

O : Conjunto com os pontos iniciais das rotas. Ou seja, são as estações de início das operações dos veículos;

D : Conjunto com os pontos finais das rotas. Ou seja, são as estações de finalização das operações dos veículos;

i : Um nó qualquer da rede;

SP_{ij} : Quantidade de viajantes diretos entre i e j . Ou seja, é uma entrada da matriz de demanda;

l_{ij} : Distância em metros da aresta (i, j) ;

S_{OD} : Rotas finais construídas pelo algoritmo;

S_{OD}^x : Uma rota qualquer do conjunto S_{OD} . O índice x indica a rota selecionada.

Outros termos também precisam ser introduzidos devido à natureza incremental da abordagem. Eles são fundamentais para calcular a taxa de semelhança R e a taxa de aumento I . Por fim, são os seguintes:

B_{OD} : Rotas bases do sistema. Ou seja, representam os padrões de viagens conhecidos pelos usuários. Além disso, são as entradas do algoritmo para construir as novos S_{OD} ;

B_{OD}^x : Uma rota selecionada do conjunto B_{OD} .

Além desses, mais quatro são necessários para auxiliar o algoritmo, embora não sejam relacionados à função objetivo. Eles são as seguintes:

PP_{OD} : São os percursos possíveis entre uma origem O e um destino D ;

PP_{OD}^x : É um percurso qualquer do conjunto PP_{OD} ;

IP_{OD} : São os percursos marcados como inviáveis entre uma origem O e um destino D . Eles não podem ser visitados;

TV : É uma pilha de nós que indica quais são os nós para o algoritmo visitar.

Finalizado, a introduções dessas notações, as primeiras variáveis são as seguintes:

D_{OD} : É a densidade de viajantes diretos do sistema;

L : Indica o somatório de todas distâncias das arestas pertencentes ao conjunto S_{OD} ;

$L(S_{OD}^x)$: É o tamanho total do percurso S_{OD}^x .

$Q_{sum}(S_{OD}^x)$: Indica o número total de viajantes diretos da rota S_{OD}^x ;

$Q^{ij}(S_{OD}^x)$: É o número de viajantes diretos da seção (i, j) ;

$q(S_{OD}^x)$: É a relação entre o tamanho da rota S_{OD}^x e o menor caminho entre a origem e o destino dela;

$b(S_{OD}^x)$: Relação entre o maior número de viajantes de uma aresta da rota S_{OD}^x e a média de viajantes diretos de todas arestas dela;

A variável L é semelhante a $L(S_{OD}^x)$. Porém, a primeira está preocupada em calcular a distância total dos percursos do sistema, já a segunda em determinar o tamanho de um percurso específico S_{OD}^x . Por fim, duas variáveis foram criadas para suportar a nova abordagem de otimização. Elas são as seguintes:

$R(S_{OD}^x, B_{OD}^x)$: Calcula a taxa de semelhança entre uma rota construída S_{OD}^x e uma base B_{OD}^x . O seu valor deve estar entre 0 e 1;

$I(S_{OD}^x, B_{OD}^x)$: É a taxa de crescimento do percurso. O seu valor relativo entre 0 e 1 indica o grau de expansão do percurso

Concluindo, a Seção 3.3.2.1 irá explicar como calcular essas variáveis descritas.

3.3.2.1 Cálculo das varáveis

Antes de prosseguir, é preciso conhecer duas variáveis auxiliares. Elas são as seguintes:

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{se os vértices } i \text{ e } j \text{ pertencem a alguma rota de } S_{OD} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

$$\Delta_{ij} \begin{cases} 1 & \text{se a aresta } (i, j) \in S_{OD} \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$$

Onde, a variável x_{ij} indica se a seção (i, j) pertence a alguma rota do S_{OD} . Porém, pertencer a uma rota não implica ser uma aresta da rota. Já Δ_{ij} serve para indicar se os nós i e j pertencem a uma aresta de alguma rota. Sendo assim, é possível calcular as seguintes variáveis:

$$L = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \Delta_{ij} l_{ij} x_{ij}$$

$$R(S_{OD}^x, B_{OD}^x) = \frac{COUNT(S_{OD}^x \cap B_{OD}^x)}{COUNT(B_{OD}^x)}$$

$$I(S_{OD}^x, B_{OD}^x) = \frac{L(S_{OD}^x)}{L(B_{OD}^x)}$$

Onde, L é facilmente calculada através das rotas S_{OD} . Já a penúltima aplica o operador de interseção de conjuntos para descobrir a quantidade de nós semelhantes entre S_{OD}^x e B_{OD}^x . Além disso, precisa da função *COUNT* para contabilizar a quantidade de nós de um percurso. A última utiliza a variável L para verificar a taxa de aumento do percurso. Por fim, a seguir é apresentado o cálculo de outra variável:

$$Q_{sum}(S_{OD}^x) = \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} SP_{ij} x_{ij}$$

Onde, Q_{sum} calcula o total de viajantes transportados por uma rota realizando todas as combinações possíveis de nós do seu percurso. Para explicar o seu cálculo, o trecho do percurso intitulado de $P1$ (formado por $1 \rightarrow 3 \rightarrow 5$) da Figura 11 será usado. Inicialmente, pode-se supor que para calculá-la somente é necessário somar os seguintes valores:

$$Q_{sum}(P1) = SP_{1,3} + SP_{3,5}$$

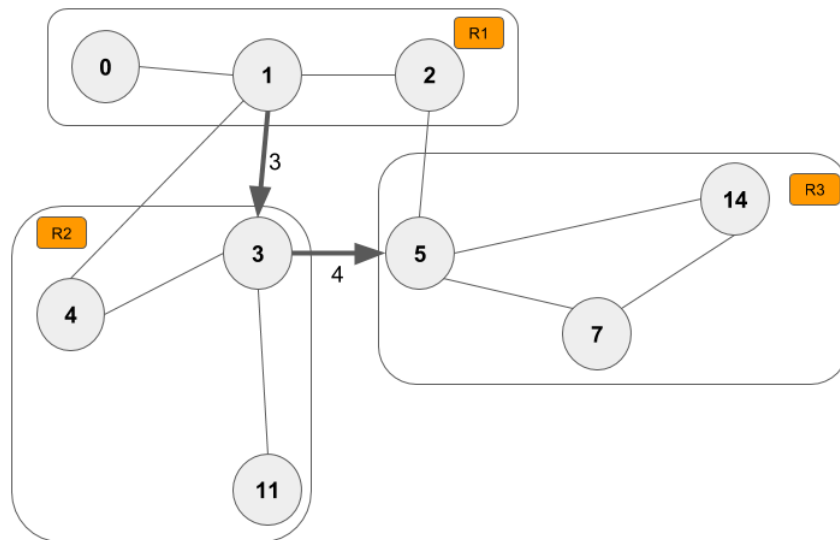


Figura 11 – Exemplo de nós agrupados por região

Fonte: Elaborado pelo autor

Entretanto, essa entendimento está errado, já que ele precisa incluir todos passageiros transportados. Portanto, é necessário também adicionar a demanda $SP_{1,5}$. Sendo assim, o cálculo correto fica assim:

$$Q_{sum}(P1) = SP_{1,3} + SP_{1,5} + SP_{3,5}$$

O cálculo da $Q_{sum}(P1)$ pode se tornar mais complexo caso sejam considerados agrupamentos lógicos de nós. Por exemplo, em algumas situações pode ser mais adequado calcular a demanda de uma região a outra em vez de nó a nó. Esse agrupamento pode indicar, por exemplo, que eles estão $1km$ (ou qualquer outra distância tolerável) próximos

um do outro. Dessa forma, se houver relativa proximidade entre nós, é possível considerar que o usuário de um ponto de ônibus possa se deslocar para o outro. Para ilustrar essa situação ainda será usado o trecho $P1$, cujo nós estão agrupados logicamente por retângulos com rótulos: R1, R2 e R3. Portanto, para calcular a demanda utilizando o conceito de regiões, tem-se a seguinte equação:

$$Q_{sum}(P1) = SP_{R1,R23} + SP_{R13,R25} + SP_{R1,R25}$$

Desmembrando cada um dos termos, o cálculo de cada uma tem a seguinte forma:

$$SP_{R1,R23} = SP_{1,3} + SP_{0,3} + SP_{2,3} + SP_{1,4} + SP_{0,4} + SP_{2,4} + SP_{1,11} + SP_{0,11} + SP_{2,11}$$

$$SP_{R13,R25} = SP_{3,5} + SP_{3,7} + SP_{3,14} + SP_{4,5} + SP_{4,7} + SP_{4,14} + SP_{11,5} + SP_{11,7} + SP_{11,14}$$

$$SP_{R1,R25} = SP_{1,5} + SP_{1,7} + SP_{1,14} + SP_{0,5} + SP_{0,7} + SP_{0,14} + SP_{2,5} + SP_{2,7} + SP_{2,14}$$

Outra variável é a $q(S_{OD}^x)$. Para calculá-la, o menor percurso denominado de P_{OD}^x deve ser encontrado. O seu cálculo é realizado através da seguinte equação:

$$q(S_{OD}^x) = L(S_{OD}^x)/L(P_{OD}^x)$$

Onde, $L(P_{OD}^x)$ é a menor distância entre a origem e o destino do percurso S_{OD}^x . Tal variável é uma relação entre o tamanho do percurso e o menor caminho. Dessa forma, pode-se limitar de modo relativo o tamanho do percurso para evitar produção de rotas grandes.

A última variável, $b(S_{OD}^x)$, limita relativamente a quantidade de passageiros em uma rota. É definida como:

$$b(S_{OD}^x) = \frac{\max(Q^{ij}x_{ij})}{Q_{sum}(S_{OD}^x)/(COUNT(S_{OD}^x)-1)}$$

Essa variável evita que a quantidade de viajantes seja distribuída desproporcionalmente ao longo do percurso.

3.3.3 Restrições operacionais

Como qualquer problema de otimização, é fundamental estabelecer as restrições operacionais. Afinal, os recursos são escassos e limitados. Por fim, as restrições adotadas pelo trabalho são:

(a) $L_{min} \leq L(S_{OD}^x) \leq L_{max}$

Restrição de tamanho: Indica o tamanho que um percurso S_{OD}^x pode atingir. O tempo normal considerado para uma rota é de 30-40 minutos por viagem. Entretanto, esse valor depende da rede alvo da otimização;

(b) $Q^{sum}(S_{OD}^x) > Q_{min}$

Restrição de menor quantidade de viajantes diretos: O número mínimo de passageiros diretos atendidos por uma rota deve ser determinado pelos especialistas de planejamento do sistema de transporte. Dessa forma, é possível garantir a eficiência e a diminuição dos custos das empresas de transporte;

(c) $q(S_{OD}^x) \leq q_{max}$

Restrição não linear: Usualmente esse fator tem que ser menor que 1.5;

(d) $b(S_{OD}^x) \leq b_{max}$

Restrição de não equilíbrio de seção: O fator de não equilíbrio de seção é o maior número de viajantes diretos de seção da rota sobre o fluxo de seção média. O valor escolhido para esse limiar ficou estabelecido para ser inferior a 1.5;

(e) $Q^{ij}(S_{OD}^x) < Q_{max}^{ij}$

Restrição do número de viajantes por seção: Número de viajantes por seção de uma rota tem que ser menor do que a maior capacidade da seção, que é determinado pela capacidade do ônibus;

(f) $\forall l_{ij} > 0.5km$

Restrição de distância entre estações: A distância média entre duas estações é $l_{ij} = 0.5 - 0.6km$. Apesar de ser apresentado um valor, isso irá depender bastante da rede. Logo, esse valor pode variar;

(g) $\sum_n x_{mn} = 1 \forall m \in S_{OD}$

Restrição de tendência: Como não existem rotas circulares, não é permitido que uma rota passe por mais de duas vezes pelo mesmo ponto de ônibus;

Além dessas restrições, é necessário adicionar algumas para considerar os percursos bases B_{OD} e os construídos S_{OD} . Por fim, elas são as seguintes:

(i) $R(S_{OD}^x, B_{OD}^x) > R_{min}$

Restrição de taxa de vértices semelhantes: Essa relação limita a taxa mínima aceitável de nós semelhantes entre o percurso base e o construído.;

(j) $I(S_{OD}^x, B_{OD}^x) < I_{max}$

Restrição de taxa de crescimento da rota: Utilizado para limitar o aumento da rota.

3.3.4 Modelo de otimização

O modelo de maximização da densidade de viajantes diretos é representado através da função objetivo seguinte:

$$\max D_{OD} = \frac{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} SP_{ij} x_{ij}}{\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \Delta_{ij} l_{ij} x_{ij}} \quad (3.2)$$

Onde, todas as variáveis desse modelo já foram apresentadas na Seção 3.3.2. Além disso, ele está sujeito a todas restrições impostas descritas na Seção 3.3.3.

3.4 Algoritmo

O algoritmo recebe como entrada as rotas bases B_{OD} , as restrições R_{min} e I_{max} , entre outras informações. A Figura 12 esboça graficamente esse fluxo. Já uma iteração do algoritmo (retângulo do meio) irá produzir um conjunto novo de rotas S_{OD} . A sua execução pode ser repetida quantas vezes forem necessárias. Porém, as sucessivas otimizações sempre terão como entrada o sistema de transporte construído na iteração anterior. Ressaltá-se que a qualidade do transporte público é mensurada através da densidade de viajantes diretos D . Já o grau de mudanças das rotas é medido através da taxa de semelhança R entre a rota base B_{OD}^x e a nova construída S_{OD}^x .

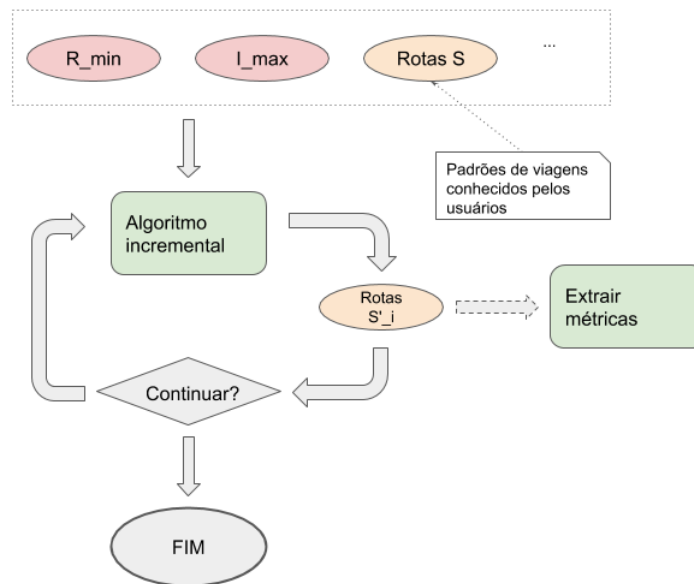


Figura 12 – Fluxo do novo algoritmo

Fonte: Elaborado pelo autor

Por fim, o algoritmo foi dividido em duas partes. A primeira tem a responsabilidade de realizar algumas verificações e delegar a execução para o núcleo do algoritmo. A segunda

é o algoritmo de busca de percurso, que é o núcleo da solução. A primeira parte é descrita através do Algoritmo 1 e 2. Já a segunda parte é descrita pelo Algoritmo 3.

O primeiro procedimento está codificado no Algoritmo 1. Inicialmente, o algoritmo recebe como entrada as rotas bases B_{OD} a serem melhoradas. Na primeira iteração (execução) do algoritmo, elas são os percursos que possuem os padrões de viagens conhecidos pelos usuários. Para cada rota base B_{OD}^x , o algoritmo obtém o ponto de ônibus inicial o (linha 3) e o terminal d (linha 4), e então ele produz uma nova rota S_{OD}^x (que satisfaz as restrições introduzidas na Seção 3.3.3) através da invocação da função *findBestRoute* (linha 6). Finalmente, o Algoritmo 1 retorna as novas rotas S_{OD} produzidas a partir das bases (ver linha 7).

Algorithm 1 Incremental optimization algorithm

```

1: procedure FINDINCREMENTALCHANGES( $B_{OD}$ )
2:   for each  $B_{OD}^x$  in  $B_{OD}$  do
3:      $o \leftarrow \text{getSourceVertex}(B_{OD}^x)$ 
4:      $d \leftarrow \text{getTargetVertex}(B_{OD}^x)$ 
5:      $S_{OD}^x \leftarrow \text{findBestRoute}(o, d, B_{OD}^x)$ 
6:      $S_{OD} \leftarrow \{S_{OD}^x\} \cup S_{OD}$ 
7:   return  $S_{OD}$ 

```

A função *findBestRoute*, codificada pelo Algoritmo 2, é responsável por selecionar rotas construídas com alta densidade de viajantes e poucas alterações em suas estruturas. A função *route* (linha 3) (codificada pelo Algoritmo 3) é responsável por construir um percurso possível PP_{OD}^x entre os vértices o e d , que satisfaça as restrições explicadas na Seção 3.3.3. Essa rota PP_{OD}^x é construída considerando o percurso base B_{OD}^x . Tal rota é adicionada como resultado possível (no conjunto PP_{OD}) na linha 4. Após isso, para evitar repetição, ela é adicionada no conjunto de rotas inviáveis IP_{OD} na linha 5, pois quando a linha 3 for executada novamente (já que é um iteração) os percursos que já tenham sido encontrados não serão considerados como caminho possível novamente. O conjunto IP_{OD} é utilizado pela função *route* para evitar percorrer caminhos inviáveis. Mais informações sobre essa função será vista a seguir.

Algorithm 2 Best route search algorithm

```

1: procedure FINDBESTROUTE( $o, d, B_{OD}^x$ )
2:   do
3:      $PP_{OD}^x \leftarrow \text{route}(o, d, B_{OD}^x)$ 
4:      $PP_{OD} \leftarrow \{PP_{OD}^x\} \cup PP_{OD}$ 
5:      $IP_{OD} \leftarrow \{PP_{OD}^x\} \cup IP_{OD}$ 
6:   while  $|PP_{OD}^x| > 1$ 
7:    $S_{OD}^x \leftarrow \text{filter}(PP_{OD}, B_{OD}^x)$ 
8:   return  $S_{OD}^x$ 

```

No Algoritmo 2, a iteração que começa na linha 3 só finaliza a sua execução na linha 6 quando a função *route* não conseguir encontrar mais nenhum percurso. Após isso, a função *filter* é invocada na linha 7. Ela irá selecionar o melhor percurso S_{OD}^x do conjunto PP_{OD} . Isso ocorrer porque foi utilizado um algoritmo de força bruta. Ou seja, primeiro se encontra todos percursos possíveis para, então, escolher aquele que tiver melhor performance. O melhor será definido como aquele percurso que possuir maior densidade de viajantes direto $D(PP_{OD}^x)$ e a menor taxa de semelhança $RR(S_{OD}^x, PP_{OD}^x)$.

O Algoritmo 3 codifica a função *route* invocada pelo algoritmo anterior. Ela é basicamente uma busca em profundidade (*Depth-First Search* - DFS). Porém, ela utiliza a restrição R_{min} e I_{max} para reduzir o espaço de busca.

Algorithm 3 Route algorithm

```

1: procedure ROUTE( $o, d, B_{OD}^x$ )
2:    $TV$  is Stack
3:    $PP_{OD}^x$  is Stack
4:    $push(TV, o)$ 
5:   while  $|TV| > 0$  do
6:      $o \leftarrow pop(TV)$ 
7:      $push(PP_{OD}^x, o)$ 
8:     if  $o == d \wedge isValid(PP_{OD}^x, B_{OD}^x)$  then
9:       return  $PP_{OD}^x$ 
10:    if  $|adjacentEdges(G, o)| > 0$  then
11:      for each  $E_{iw}$  in  $adjacentEdges(G, o)$  do
12:        if  $isValid(\{PP_{OD}^x, w\}, B_{OD}^x)$  then
13:           $push(TV, w)$ 
14:        else
15:           $IP_{OD} \leftarrow \{PP_{OD}^x, w\} \cup IP_{OD}$ 
16:        else
17:           $pop(PP_{OD}^x)$ 
18:           $IP_{OD} \leftarrow \{PP_{OD}^x\} \cup IP_{OD}$ 
19:    return  $\emptyset$ 

```

Esse algoritmo começa declarando duas pilhas na linha 2 e 3. A pilha TV é utilizada para salvar os próximos nós a serem visitados. Tal recurso é utilizado pela busca em profundidade padrão. Já a segunda pilha PP_{OD}^x indica o um percurso que está sendo construído. Na linha 4 o vértice o , que é o de origem, é adicionado para ser o próximo a ser visitado. Já da linha 5 até 15 é executado uma iteração que irá continuar até que não haja mais nenhum nó a ser visitado na pilha TV .

Na linha 6, o nó a ser analisado é obtido e armazenado no nó o . Em seguida, na linha 7, ele é adicionado ao percurso PP_{OD}^x . Já na linha 8 é verificado se ele é o nó de destino d e se é um caminho válido. Caso isso seja verdadeiro, a execução da função termina na linha 9. Caso contrario, na linha 10 é feita outra verificação para saber se há nós adjacentes ao vértice o .

Se a condição da linha 10 for verdadeira, o próximo passo será iterar por cada um dos nós adjacentes de o , que é denominado de w . Isso ocorre na linha 11. Na linha 12 é checado se o nó adjacente forma um percurso válido. Isso é feito nesse trecho porque permite diminuir o espaço de busca. A função *isValid* irá verificar se as restrições são respeitadas. Além disso, ele verifica se o percurso que o próximo nó w irá formar já é considerado inviável. Essa checagem é feita através do conjunto de percursos inviáveis IP_{OD} . Se o percurso já existir nesse conjunto, o nó w não é adicionado na pilha TV para ser visitado.

Já se na linha 12 um caminho for avaliado como válido, na linha 13 o nó w é adicionado como possível candidato a ser visitado. Caso contrário, o percurso formado pelo w é adicionado ao conjunto de inviáveis IP_{OD} . Dessa forma, ela não irá por esse caminho.

Por fim, caso a condição da linha 10 seja falsa, o algoritmo na linha 17 retira da pilha o último nó adicionado na PP_{OD}^x e adiciona na linha 18 o percurso PP_{OD}^x no conjunto de inválidos IP_{OD} . Após isso, o processo recomeça novamente na linha 6. Se não for possível encontrar nenhum caminho, o algoritmo irá retornar um conjunto vazio na linha 16.

4 EXPERIMENTO

O processo de validação da presente proposta seguiu as mesmas estratégias adotadas pelos trabalhos analisados. Entretanto, algumas adaptações foram necessárias. Para ambos tipos, os parâmetros de entrada são a rede de transporte e a matriz de demanda. Porém, os algoritmos da literatura não precisam das linhas correntes da cidade como entrada. Enquanto, o novo as exige. Sendo assim, essa diferença foi contornada através da construção das rotas iniciais para as redes que não as fornecem.

Por fim, esse capítulo foi organizado em algumas seções. Inicialmente, a Seção 4.1 realiza uma introdução às estratégias de validação da literatura. Na Seção 4.2 as métricas para mensurar a eficácia e o custo dos percursos são apresentadas. Já na Seção 4.3 são descritas as três bases de dados escolhidas para a validação, listando as vantagens, desvantagens, principais estruturas e trabalhos que as usaram. Depois disso, a Seção 4.4 descreve o plano de validação, indicando as questões de pesquisa do experimento. Enquanto a Seção 4.5 apresenta a configuração da sua execução. Por fim, a Seção 4.6 discute os principais resultados e conclusões.

4.1 Estratégias de validação da literatura

A literatura possui dois modos de validação. O primeiro utiliza uma base de dados desconhecida. Por isso, é desaconselhado por sua baixa abrangência, um vez que não possui outras abordagens para serem comparadas. Porém, apesar disso, realizam comparações com resultados ideais construídos, por exemplo, através da geração de rotas de menor distância entre dois pontos. Já o segundo modo identificado realiza comparações entre os resultados de diferentes propostas utilizando uma rede referenciada por muitos. Essa estratégia está ilustrada na Figura 13.

O último modo admite que uma proposta é superior quando gera resultados maiores do que os alcançados pelas outras. A rede de Mandl [1980] foi a preferida dos trabalhos que o adotaram, pois é o *becnhmark* mais conhecido e divulgado. Porém, esses trabalhos também utilizam outra(s) base(s) para realizar um caso de estudo aplicando o primeiro modo de validação descrito. Dessa forma, eles ampliam sua validação considerando estruturas diferentes.

4.2 Métricas

As métricas servem para mensurar a qualidade das rotas. Dessa forma, é possível comparar e avaliar as técnicas de otimização, além de responder as questões de pesquisas levantadas. Há dois tipos de medidas. O primeiro apresentado na Seção 4.2.1 mensura a eficácia. Enquanto o segundo tipo descrito na Seção 4.2.2 estima o custo de implanta-

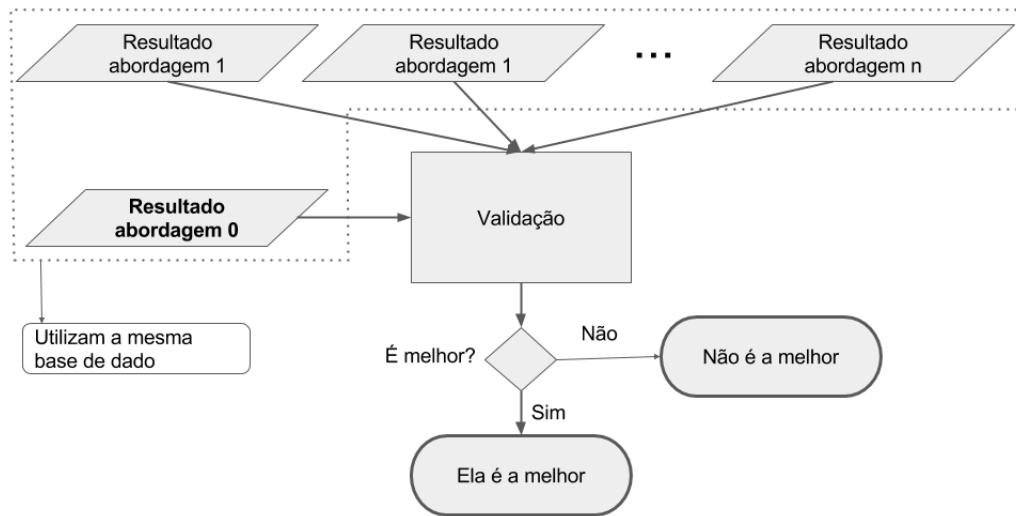


Figura 13 – Principal estratégia de validação da literatura

Fonte: Elaborado pelo autor

ção. Porém, somente poderá ser avaliado nesta abordagem, já que as da literatura não forneceram os percursos iniciais.

Apesar da Seção 3 já ter explicado como calculá-los, é importante destacá-los nesta seção, uma vez que o propósito deles nesse contexto é servir como ferramenta para realizar comparações com outras abordagens.

4.2.1 Métricas de eficácia

Essas medidas avaliam a eficácia dos percursos construídos. Sendo assim, as escolhidas foram as seguintes:

- d^0 : Indica a demanda de viagens satisfeitas sem nenhuma transferência de linhas;
- D : Verifica a quantidade de viajantes diretos atendidos por quilômetro pelas rotas;
- L : É o tamanho total em quilômetros dos percursos.

4.2.2 Métricas de custo

Essa medida busca mensurar o custo de implantação e o grau de aceitação dos percursos construídos. Quanto menor for a diferença entre as rotas existentes e as novas, menor o custo da solução. Essa diferença é medida através da quantidade pontos de ônibus semelhantes entre elas. Para isso, basta verificar a taxa de semelhança R descrita abaixo:

- R : É taxa de semelhança entre dois sistemas de transporte público. O primeiro sistema é a entrada para o algoritmo de otimização incremental. Enquanto o segundo é o resultado do algoritmo.

Porém, os trabalhos da literatura não disponibilizam as rotas bases. Portanto, os custos somente poderão ser aferidos para a presente abordagem.

4.3 Base de dados

Essa seção descreve as bases de dados de transporte adotadas na validação. A primeira é a rede de Mandl [1980]. A segunda são as quatro redes de Mumford [2013]. Por fim, a última é a cidade de Maceió/AL.

4.3.1 Rede de Mandl [1980]

A primeira base de dados é a rede de transporte de Mandl [1980], que é o *benchmark* mais referenciado para realizar comparação entre abordagens. Como observado na Seção 2.3.1.8, 14 trabalhos analisados validaram suas técnicas nela. Portanto, isso possibilita comparar os resultados do novo algoritmo com os disponibilizados por eles. Ou seja, é possível estimar sua eficácia.

4.3.1.1 Vantagens

Pode-se resumir suas principais **vantagens** em:

- V1:** Tempo reduzido de execução dos algoritmos devido à sua pequena dimensão;
- V2:** Facilidade de acesso ao seu grafo, matriz de demanda e resultados de outras abordagens;
- V3:** Grande quantidade de trabalhos para comparação;
- V4:** *Benchmark* mais investigado e aceito pela literatura relevante [Kechagiopoulos and Beligiannis, 2014].

O seu grande diferencial é quantidade considerável de abordagens para comparações. Entretanto, dos 14 analisados, somente 9 trabalhos disponibilizaram as rotas finais. Enquanto 4 não as disponibilizaram, listando somente valores de algumas métricas. Já um trabalho possuía resultados similares com outra proposta, por isso foi desconsiderada.

Portanto, somente 9 trabalhos foram utilizados para análise e comparação. Além disso, cada proposta aplicou seu algoritmo em 4 cenários diferentes formados por: 4 rotas, 6 rotas, 7 rotas ou 8 rotas, totalizando 225 rotas ($9 \times 4 + 9 \times 6 + 9 \times 7 + 9 \times 8$) para comparação. Entretanto, o Nikolic and Teodorovic [2014] considerou um cenário adicional de 12 rotas. Porém, foi desconsiderado porque nenhum outro trabalho incluiu essa possibilidade.

A abordagem de Kechagiopoulos and Beligiannis [2014] foi comparada com 7 propostas diferentes. Ele foi o que mais realizou comparações dentre os trabalhos analisados. Logo, observa-se que a presente proposta realizou duas comparações a mais. Ou seja, mais um ponto positivo.

4.3.1.2 Desvantagens

Apesar dela ser bastante referenciada, possui as seguintes **desvantagens**:

- DV1:** É considerada pequena por possuir 15 nós. Dessa forma, um algoritmo eficiente nela pode não ser, por exemplo, em uma rede com mais de 1000 nós;
- DV2:** Não possui as rotas iniciais para a execução do algoritmo incremental. Portanto, a comparação direta entre as propostas não pode ser realizada;
- DV3:** Devido à desvantagem **DV2**, adaptações precisam ser feitas para realizar comparação entre as propostas. Ou seja, é preciso fabricar as rotas iniciais.

4.3.1.3 Principais estruturas

Ela é formada por um grafo com 15 nós e 20 arestas apresentado na Figura 14. O valor em cada aresta é o tempo de deslocamento em minutos entre o nó origem e o destino. Por exemplo, do nó 0 ao 1 são necessários 8 minutos.

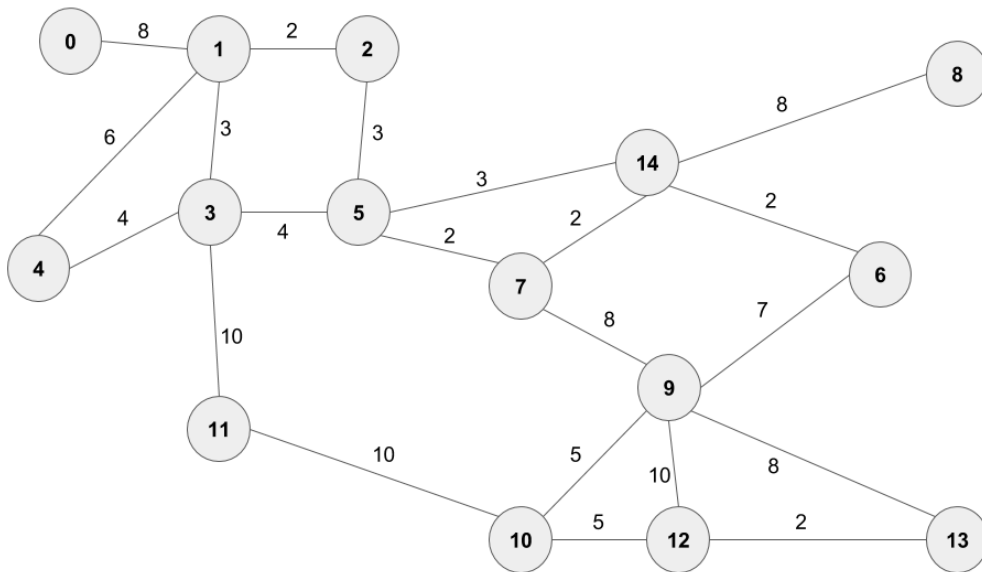


Figura 14 – Rede de transporte de Mandl [1980]

Fonte: [Mandl, 1980]

Já a matriz de demanda de viagens apresentada na Tabela 10 é constituída por 15×15 entradas, totalizando 225 estimativas de viagens. Além disso, possui uma demanda total de viagens de 15.570. Na maioria dos trabalhos analisados, serviu para avaliar globalmente os percursos construídos. Através dela, é possível saber, por exemplo, que do nó 0 ao 8 há uma estimativa de 30 viagens.

4.3.1.4 Trabalhos para comparação

Os trabalhos para comparação são necessários para verificar a qualidade dos resultados do novo algoritmo. Sendo assim, a Tabela 11 lista os valores das métricas d^0 , D , L e R

-	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
0	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0
1	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0
2	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0
3	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0
4	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0
5	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0
6	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0
7	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0
8	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0
9	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0
10	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0
11	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0
12	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0
13	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 10 – Matriz de demanda de viagem da rede de Mandl [1980]

Fonte: [Mandl, 1980]

para as propostas e cenários indicados na primeira e segunda coluna. As três primeiras métricas aferem a eficácia. Já a última mensura o custo. Entretanto, como a literatura não disponibilizou as rotas iniciais, não foram obtidos seus valores.

Tabela 11 – Resultados sobre o *benchmark* de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

Referência	Cenário	d^0	D	L	R
Chakroborty [2003]	4	89.98	127.36	110.00	-
Chakroborty [2003]	6	93.45	86.44	168.33	-
Chakroborty [2003]	7	96.79	88.21	170.83	-
Chakroborty [2003]	8	86.38	93.29	144.17	-
Fan et al. [2009]	4	91.91	136.29	105.00	-
Fan et al. [2009]	6	93.38	117.89	123.33	-
Fan et al. [2009]	7	92.68	104.31	138.33	-
Fan et al. [2009]	8	91.84	70.04	204.17	-
Fan and Mumford [2010]	4	94.28	119.84	122.50	-
Fan and Mumford [2010]	6	94.54	82.16	179.17	-
Fan and Mumford [2010]	7	94.99	76.83	192.50	-

Tabela 11 (Continua)

Referência	Cenário	d^0	D	L	R
Fan and Mumford [2010]	8	97.24	64.20	235.83	-
Nikolic and Teodorovic [2013]	4	91.91	117.62	121.67	-
Nikolic and Teodorovic [2013]	6	97.24	81.11	186.67	-
Nikolic and Teodorovic [2013]	7	98.84	74.77	205.83	-
Nikolic and Teodorovic [2013]	8	98.97	64.21	240.00	-
Mumford [2013]	4	91.14	114.28	124.17	-
Mumford [2013]	6	96.08	81.23	184.17	-
Mumford [2013]	7	98.01	69.36	220.00	-
Mumford [2013]	8	99.10	63.63	242.50	-
Nikolic and Teodorovic [2014]	4	95.05	120.82	122.50	-
Nikolic and Teodorovic [2014]	6	94.35	95.80	153.33	-
Nikolic and Teodorovic [2014]	7	94.86	83.60	176.67	-
Nikolic and Teodorovic [2014]	8	96.40	64.10	234.17	-
Kilic and Gok [2014]	4	91.97	121.01	118.33	-
Kilic and Gok [2014]	6	96.98	83.89	180.00	-
Kilic and Gok [2014]	7	98.39	67.09	228.33	-
Kilic and Gok [2014]	8	98.78	61.93	248.33	-
Kechagiopoulos and Beligiannis [2014]	4	92.23	114.88	125.00	-
Kechagiopoulos and Beligiannis [2014]	6	96.21	88.55	169.17	-
Kechagiopoulos and Beligiannis [2014]	7	98.20	78.41	195.00	-
Kechagiopoulos and Beligiannis [2014]	8	98.46	65.00	235.83	-
Nayeem et al. [2014]	4	98.14	94.52	161.67	-
Nayeem et al. [2014]	6	99.81	66.60	233.33	-
Nayeem et al. [2014]	7	99.55	58.49	265.00	-

Tabela 11 (Continua)

Referência	Cenário	d^0	D	L	R
Nayeem et al. [2014]	8	99.87	48.72	319.17	-

4.3.2 Redes de Mumford [2013]

A segunda base de dados possui quatro redes de transportes surgidas com o objetivo de suprir a pequena dimensão da rede de Mandl [1980]. Portanto, considerá-las é promissor e possibilita aumentar a cobertura da validação.

4.3.2.1 Vantagens

Um de seus grandes diferenciais é o seu tempo de vida, já que foram introduzidas em 2013. Além disso, possuem dimensões grandes. Por fim, resume-se suas vantagens na seguinte lista:

- V1:** Foram propostas a pouco tempo;
- V2:** Possuem dimensões consideradas médias;
- V3:** Mais um *benchmark* para validação.

4.3.2.2 Desvantagens

Algumas vantagens implicitamente implicam também nas desvantagens. Por exemplo, como elas são recentes, possuem poucos trabalhos para comparação. Portanto, tem-se as seguintes desvantagens:

- DV1:** Possuem somente 3 trabalhos para validação em razão do pouco tempo da criação.
- DV2:** Apesar das suas grandes dimensões, ainda são pequenas quando comparadas com a cidade de Maceió/Al;

Somente 3 trabalhos validaram com elas. O primeiro foi o próprio proponente, o segundo o Kilic and Gok [2014], e o último o Nayeem et al. [2014]. Entretanto, apenas o primeiro e o terceiro disponibilizaram as rotas finais. Como o segundo não as disponibilizou, não foi possível extrair os valores das métricas definidas.

4.3.2.3 Principais estruturas

A primeira rede possui 30 nós. Já a segunda possui 70. Enquanto as últimas duas possuem mais de 100 nós. Os seus grafos e matrizes de demanda de viagens estão dispo-

níveis para consulta no link¹ fornecido pela autora. Por serem grandes, não foi possível apresentá-las nesta seção. A Tabela 12 resume suas principais informações.

Rede	Quantidade de nós	Quantidade de arestas
Mumford0	30	90
Mumford1	70	210
Mumford2	110	385
Mumford3	127	425

Tabela 12 – Demandas de viagens das redes de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2.4 Trabalhos para comparação

Três trabalhos validaram com elas. Porém, somente dois disponibilizaram suas rotas finais. O que as não disponibilizou foi o de Kilic and Gok [2014]. Entretanto apresentou os valores da métrica d^0 . Por fim, os seus principais resultados estão listados na Tabela 13.

Referência	Rede	Cenário	d^0	D	L	R
Mumford [2013]	Mumford0	12	46.55	251.83	632.50	-
Mumford [2013]	Mumford1	15	46.07	522.53	1698.34	-
Mumford [2013]	Mumford2	56	36.15	373.40	4693.34	-
Mumford [2013]	Mumford3	60	35.37	407.21	5554.18	-
Kilic and Gok [2014]	Mumford0	12	69.73	-	-	-
Kilic and Gok [2014]	Mumford1	15	45.10	-	-	-
Kilic and Gok [2014]	Mumford2	56	33.88	-	-	-
Kilic and Gok [2014]	Mumford3	60	27.56	-	-	-
Nayeem et al. [2014]	Mumford1	15	34.74	617.21	1084.17	-
Nayeem et al. [2014]	Mumford2	56	20.22	410.67	2386.67	-
Nayeem et al. [2014]	Mumford3	60	17.45	407.26	2740.84	-

Tabela 13 – Resultados da literatura nas redes de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

O trabalho de Kilic and Gok [2014] apresentou soluções utilizando *Hill Climbing (HC)* e o *Tabu Search (TS)*. Entretanto, o primeiro apresentou os melhores resultados. Por isso, só foram consideradas suas soluções.

4.3.3 Rede de Maceió/AL

A última base de dados é a rede de transporte da cidade Maceió/AL. Ela foi incluída para adicionar um cenário real no experimento. Além disso, nenhum trabalho a considerou nesse processo.

¹ <<https://users.cs.cf.ac.uk/C.L.Mumford/Research%20Topics/UTRP/>>

4.3.3.1 Vantagens

Sua principal vantagem é ter sido extraída de um ambiente operacional real. Por fim, resume-se as suas vantagens na seguinte lista:

- V1:** Extraída de ambiente operacional real;
- V2:** Possui as rotas iniciais;
- V3:** Possui mais de 1000 nós.

A vantagem **V2** foca no principal ponto da proposta. Ou seja, ela foi a única a fornecer as rotas iniciais para o algoritmo (as outras precisaram construí-las aleatoriamente). Portanto, é possível compará-las com as novas utilizando a métrica de custo.

A realização do experimento com ela e com as outras duas aumentou o grau de abrangência da validação, uma vez que poucos verificaram suas propostas com tantas bases diferentes. Além disso, a Seção 2.3.1.7 constatou que das 35 redes analisadas, apenas 6 possuíam mais de 1000 nós. Entretanto, quatro delas foram utilizadas somente por um trabalho. Portanto, apenas três trabalhos foram validados com essa dimensão.

4.3.3.2 Desvantagens

Resume-se suas principais desvantagens nos seguintes itens:

- DV1:** Maior tempo de processamento do algoritmo devido à sua dimensão;
- DV2:** Matriz de demanda disponibilizada por região;
- DV3:** Matriz de demanda antiga.

A desvantagem **DV1** surge devido ao seu tamanho, o qual implica um espaço de busca maior. Além disso, como a sua matriz de origem-destino possui apenas a demanda de viagem entre bairros (desvantagem **DV2**), é necessária a sua conversão para a entre pontos de paradas suportada pelo algoritmo. Dessa forma, uma transformação errada pode gerar ruídos. Nota-se que as outras duas redes consideraram o tipo adequado. Por fim, a desvantagem **DV3** decorre do período da criação dessa matriz, que foi em 2003.

4.3.3.3 Principais estruturas

O seu grafo e a sua matriz de demanda foram disponibilizadas pelo órgão gestor de transporte público da cidade Maceió/AL. A primeira estrutura possui 1016 nós e 1398 arestas, cujos pesos são as distâncias em quilômetros entre dois nós. A segunda disponibilizou as estimativas de deslocamento entre bairros em um dia. Além disso, é constituída por 33 bairros com uma quantidade total de viagens de 18.252.879.

O processo de construção do seu grafo não foi baseado nas disposições das ruas da cidade, mas através das rotas existentes. Uma estrada não incluída em alguma linha tem uma baixa probabilidade de ser no futuro. Possivelmente por causa da sua curta largura

ou pela proibição de veículos pesados. Sendo assim, tal simplificação permite diminuir o espaço de busca e o tempo de execução do algoritmo.

4.3.3.4 Trabalhos para comparação

Esse é o primeiro trabalho que a está usando. Portanto, não há propostas para comparações. Para contornar esse problema, serão utilizadas as suas rotas iniciais. A Tabela 14 apresenta os resultados das métricas escolhidas das rotas completas e divididas.

Tipo	d^0	D	L	R
Completa	28.25	1639.12	3129.14	-
1° metade	13.72	1610.79	1546.81	-
2° metade	9.85	1130.06	1582.33	-

Tabela 14 – Resultados para comparações obtidos na rede de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

O algoritmo não considerada rotas circulares. Entretanto, todas as de Maceió são. Por isso, foram divididas em dois pedaços de igual tamanho. Dessa forma, ele precisou ser executado para cada metade.

4.4 Metodologia do experimento

Tentou-se criar o processo de validação de modo semelhante aos dos trabalhos analisados. Por isso, considerou-se três bases diferentes. A base de Mandl [1980] e Mumford [2013] refletem as estruturas preferidas da literatura. Já a de Maceió/AL possibilita avaliar o algoritmo em um ambiente operacional real.

O experimento foi dividido em duas estratégias. Uma considera as duas primeiras bases de dados. Já a outra considera apenas a última. Cada uma delas pertence a uma das classes identificadas na Seção 2.3.1.7, tipificando-as pela quantidade de nós. Por fim, o restante desta seção está dividida em apresentação das questões de pesquisa na Seção 4.4.1 e na descrição das duas estratégias na Seção 4.4.2.

4.4.1 Questões de pesquisas

Esta seção descreve as principais questões investigadas pelo experimento fundamentadas na metodologia GQM. Por fim, são definidas a seguir:

QE1 Qual é a eficácia do algoritmo proposto?

Ela é respondida através das medidas d^0 , D e L ;

QE2 O algoritmo proposto é mais eficaz do que as abordagens existentes?

Para respondê-la, é preciso realizar comparações com as métricas da questão **QE1** entre o novo algoritmo e os da literatura;

QE3 Qual o custo dos resultados do algoritmo proposto?

Busca descobrir se os resultados possuem mais chances de serem aceitos pelos usuários. A medida de mensuração do custo é a taxa de vértices semelhantes R . Quanto maior seu valor, mais chances terão de serem aceitos.

Através da definição delas, é possível construir estratégias para responder-las. A Seção 4.4.2 irá descrever os principais passos para alcançar tal objetivo.

4.4.2 Estratégias

O experimento foi dividido em duas estratégias. Uma tem a responsabilidade de indicar os passos da validação para as duas primeiras redes. Já a outra os descreve para a última base. A diferença principal reside no processo de definição das rotas iniciais. A primeira precisará construí-las. Enquanto a segunda não, pois já as possui. Porém, antes de explicá-las, é apresentado o fluxo comum entre elas ilustrado na Figura 15. Já a Seção 4.4.2.1 e 4.4.2.2 destacam somente informações pertinentes de cada uma.

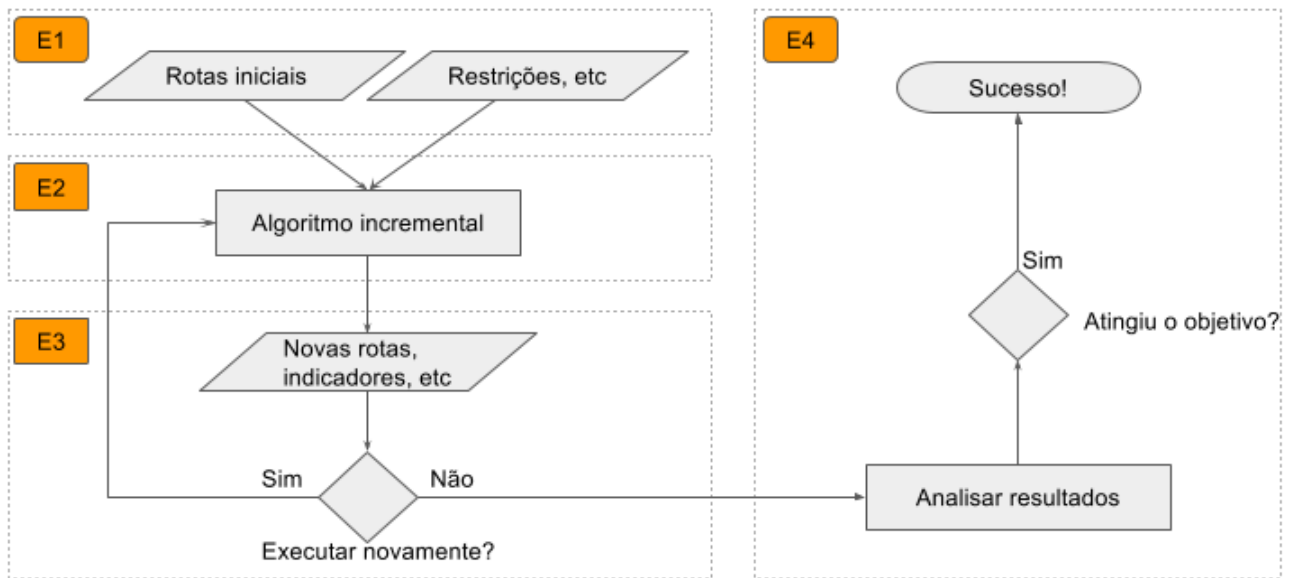


Figura 15 – Fluxo de execução comum as duas estratégias de experimentos

Fonte: Elaborado pelo autor

As suas etapas são explicadas a seguir:

- E1:** Determinar as rotas iniciais considerando as existentes ou as construindo de modo aleatório;
- E2:** Executar o algoritmo com as linhas da última execução (ou as do próprio passo **E2** ou as do **E1**, caso seja a primeira iteração);
- E3:** Persistir o resultado com informações pertinentes. Além disso, utilizá-las como entrada para executar novamente o passo **E2**. A execução continuará até ser alcançado o número máximo de iterações ou não ser mais possível indicar novas melhorias;

E4: Por fim, tentar responder as questões de pesquisa definidas.

A etapa **E1** depende da estratégia. Para a primeira, consistirá em construir rotas iniciais aleatórias. E para a segunda, utilizará as existentes da cidade de Maceió/AL. Os passos subseqüente praticamente não precisam de adaptações. Mas caso necessário, serão indicadas.

O passo **E2** busca melhorias para os percursos de entrada do algoritmo. A sua execução está condicionada a definição de algumas restrições. Entretanto, não será indicado os valores de referências para todas. As únicas explicitadas serão as seguintes:

PE1: Taxa mínima de semelhança (R_{min});

PE2: Taxa máxima de crescimento (I_{max});

PE3: Quantidade máxima de iterações (execução do algoritmo) (IN_{max}).

Devido à natureza delas, dificilmente os novos percursos obtidos na primeira execução terão um nível de otimização semelhante aos da literatura. A tendência é que se aproximem após algumas execuções, podendo ser confirmada ou rejeitada através dos resultados finais, os quais são influenciados pela escolha dos seus valores. Por isso, devem ser determinados com cuidado. Por fim, eles serão indicados na Seção 4.5 para cada estratégia.

A etapa **E3** é responsável por armazenar os resultados com o intuito de registrar o histórico de melhorias de cada iteração. Através dessas informações, a qualidade do algoritmo poderá ser comparada com as dos outros trabalhos. Entretanto, somente é válida para a primeira estratégia, uma vez que a segunda usa uma base não considerada por eles. Por fim, as principais informações a serem salvas são as seguintes:

II1: Número da iteração executada IN : Permite rastrear a iteração das melhorias sugeridas;

II2: Rotas construídas S_{OD} : Registra a sequência de vértices de cada rota. Pode ser útil para extrair alguma informação adicional inicialmente não planejada;

II3: Demanda atendida sem transferências d^0 , densidade de viajantes diretos D , percurso total L e taxa de vértices semelhantes R : Indicadores de qualidade necessários para comparar com os trabalhos relacionados.

Por fim, a etapa **E4** tenta responder as questões de pesquisa definidas. Além disso, também verifica se o objetivo da validação **OV** (apresentado em cada seção das estratégias) foi alcançado. Finalmente, após a descrição do planejamento, o experimento é executado com as configurações listadas na Seção 4.5. Já os resultados e as análises estão descritos na Seção 4.6.

4.4.2.1 1° estratégia

Esta seção descreve como o experimento será conduzido para as duas primeiras bases. O seu produto final são os indicadores para responder as questões de pesquisas levantadas na Seção 4.4.1. Por fim, o seu objetivo é:

OV1: Gerar evidências que, após algumas iterações do algoritmo, os novos percursos possuem os mesmos níveis de qualidade dos trabalhos da literatura listados na Tabela 11 e na 13.

Entretanto, para verificá-lo, já que não foram disponibilizados, precisam ser construídos os cenários iniciais da rede de Mandl [1980] com 4, 6, 7 e 8 rotas. Além também dos de Mumford [2013] com 12, 15, 56 e 60 rotas (um para cada rede). A Tabela 15 agrupa esses valores para facilitar o entendimento.

Referência	Rede	Cenário
Mandl [1980]	Mandl0	4
Mandl [1980]	Mandl0	6
Mandl [1980]	Mandl0	7
Mandl [1980]	Mandl0	8
Mumford [2013]	Mumford1	12
Mumford [2013]	Mumford2	15
Mumford [2013]	Mumford3	56
Mumford [2013]	Mumford4	60

Tabela 15 – Cenários possíveis para a rede de Mandl [1980] e as de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

Já a Figura 16 exemplifica graficamente o fluxo dessa estratégia. Os retângulos laranjas representam as etapas da validação, os círculos ovais as amostras de cenários e os triângulos as rotas. As cores preenchendo o último elemento servem para evidenciar suas diferenças. Por fim, a etapa **E1** construiu 1000 amostras de cenários com 4 rotas. Onde, cada uma delas deve ser enviada separadamente para as etapas **E2**, **E2** e **E3**.

Por conseguinte, uma amostra de cenário pode ser entendida como uma combinação de percursos aleatórios gerados previamente para ser entrada do algoritmo. Por exemplo, quatro rotas qualquer podem formar um cenário, seis também, e assim sucessivamente. A construção deve ser aleatória para evitar a preferência de algum tipo de estrutura. Entretanto, também pode ser guiada pela análise estatística dos resultados disponibilizadas pela literatura. Porém, esse caso somente é válido para a primeira rede, já que poucos consideraram a segunda base. Destaca-se que a construção de muitas amostras possibilita verificar o algoritmo com estruturas variadas além de realizar um teste de hipótese com os resultados.

Constatou-se que as abordagens da literatura já possuem capacidade de gerar sistemas de qualidade significativa. Por exemplo, a demanda de viagens atendida sem transferência

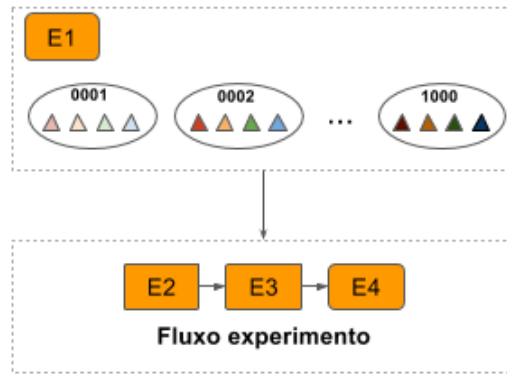


Figura 16 – Fluxo de execução da 1ª estratégia do experimento

Fonte: Elaborado pelo autor

d^0 obtidas por eles na primeira rede atinge níveis acima dos 90%. Porém, o objetivo da otimização incremental não é unicamente alcançar esse patamar, mas gerar evidências da evolução gradativa respeitando os padrões de viagens conhecidos pelos usuários. Por isso, os cenários iniciais produzidos pela etapa **E1** não precisam ser eficientes. Se fossem, não haveria motivo para melhorá-los. Portanto, devem possuir uma d^0 menor que um limite d_{max}^0 . Além dessas, outras restrições devem ser consideradas como o número mínimo e máximo de nós, tempo mínimo e máximo de viagem, e o tamanho mínimo e máximo do percurso. Por fim, são resumidas a seguir:

RC1: $d^0 < d_{max}^0$;

RC2: $N_{min} < N(J^x) < N_{max}$;

RC2: $L_{min} < L(J^x) < L_{max}$;

A variável d_{max}^0 indica o valor máximo que a demanda atendida sem transferências pode alcançar. Já N_{min} e N_{max} delimitam a quantidade mínima e máxima de nós. Além disso, L_{min} e L_{max} restringem o tamanho total dos percursos. Na Seção 4.5 os seus valores serão descritos para as duas bases dessa estratégia.

4.4.2.2 2ª estratégia

Essa estratégia foi construída para os dados da cidade de Maceió/AL. Como nenhum outro trabalho a considerou, não é possível realizar comparações dos seus resultados. Entretanto, a primeira estratégia já realiza utilizando outras bases. Por isso, o impacto dessa limitação é baixo. Sendo assim, o seu objetivo é:

OV1: Mostrar a viabilidade do algoritmo com redes de aproximadamente 1000 nós. Além disso, também verificar se a cada iteração, o resultado do algoritmo é satisfatório.

Devido à sua dimensão, não é possível construir os seus percursos iniciais como a primeira estratégia. Entretanto, ela já fornece 88 rotas iniciais. Feitas essas considerações, a Figura 17 expõe graficamente o processo do experimento.

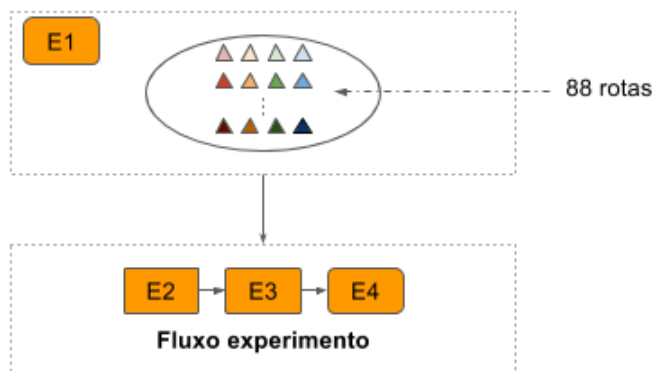


Figura 17 – Fluxo de execução da 2ª estratégia do experimento

Fonte: Elaborado pelo autor

Como se pode extrair da ilustração, a diferença primordial dessa estratégia com a anterior é o processo de determinação das rotas. Para a atual, não é preciso construí-las, já que serão utilizadas as fornecidas pela base, representadas graficamente pelo círculo oval da etapa **E1**. Além disso, somente são consideradas essas em decorrência da sua dimensão. Entretanto, na estratégia anterior, o algoritmo é executado para um número de grande e diferentes de amostras de cenários (por causa do pequeno tamanho das suas redes). Dessa forma, essa limitação não é tão impactante.

4.5 Execução do experimento

Essa seção irá expor os parâmetros do experimento de cada uma das estratégias descritas na Seção 4.4.2. Além disso, também são descritos os cenários iniciais de cada rede através de gráficos estatísticos.

4.5.1 1ª estratégia

4.5.1.1 Rede de Mandl [1980]

4.5.1.1.1 Determinação das rotas iniciais

A Tabela 16 lista as restrições e seus valores para a construção dos cenários iniciais. A primeira coluna identifica quais são e as subsequentes são os valores para cada cenário identificado na primeira linha. Além disso, a segunda linha indica as quantidades de amostras de cenários construídos.

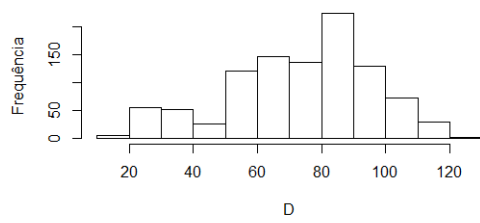
Como o número de amostras de cada cenário foi de 1000, não dará para apresentar as suas estruturas isoladamente. Dessa forma, serão realizadas análises descritivas incluindo

Parâmetro de construção	Cenário 4	Cenário 6	Cenário 7	Cenário 8
Número de amostras	1000	1000	1000	1000
d_{max}^0	50%	50%	50%	50%
N_{min}	17	27	34	38
N_{max}	28	38	46	51
L_{min}	57.0 km	89.0 km	126.0 km	144.0 km
L_{max}	130.0 km	175.0 km	21.07 km	230.0 min

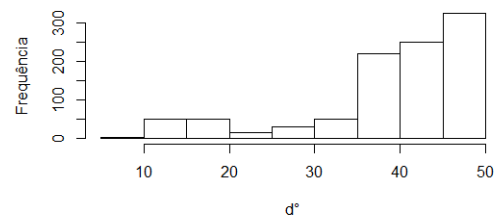
Tabela 16 – Parâmetros de construção dos cenários iniciais da rede de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

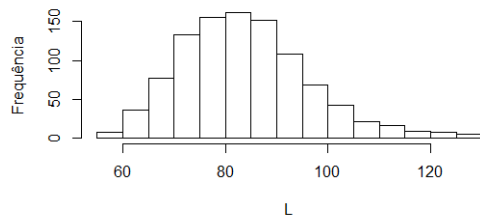
histogramas para as variáveis: D , d^0 , L e N . Sendo assim, a Figura 18, 19, 20 e a Figura 21 as ilustram graficamente para cada cenário. Os eixos x indicam os seus valores e os eixos y a quantidade de amostras com esses valores.



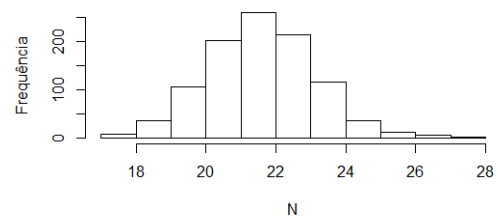
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



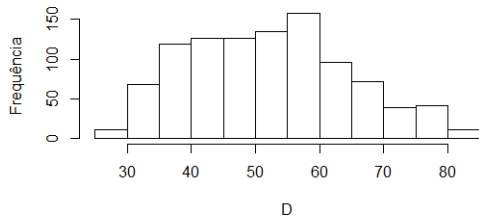
((c)) Tamanho total dos percursos



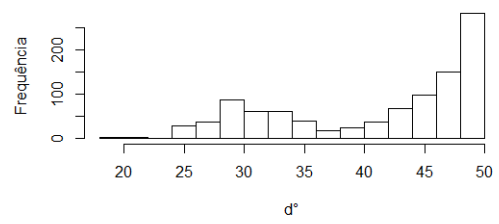
((d)) Número de nós

Figura 18 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 4 rotas de Mandl [1980]

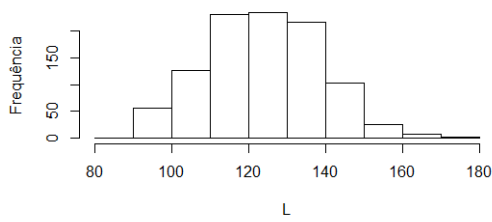
Fonte: Elaborado pelo autor



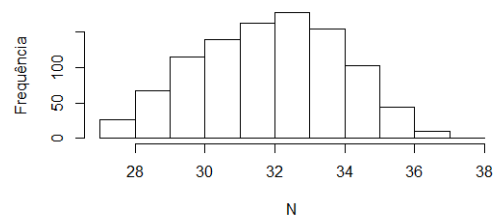
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



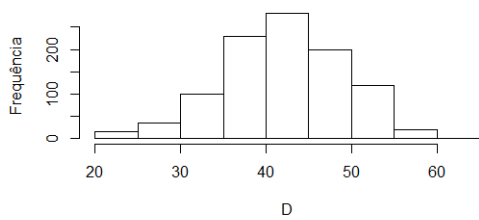
((c)) Tamanho total dos percursos



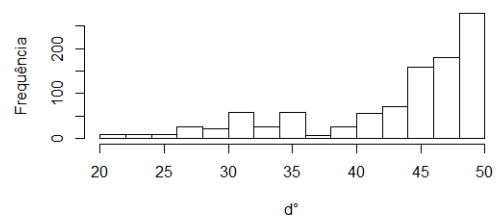
((d)) Número de nós

Figura 19 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 6 rotas de Mandl [1980]

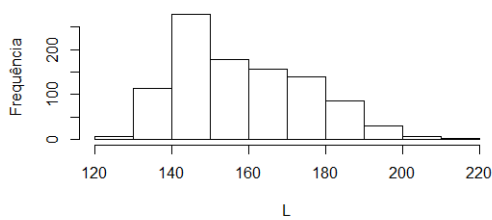
Fonte: Elaborado pelo autor



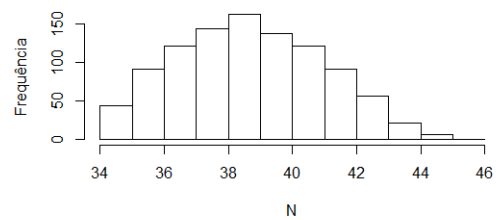
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



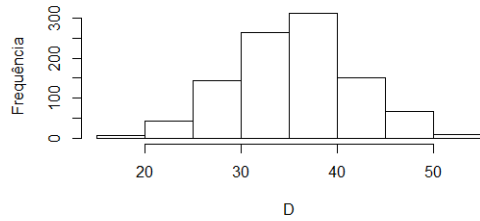
((c)) Tamanho total dos percursos



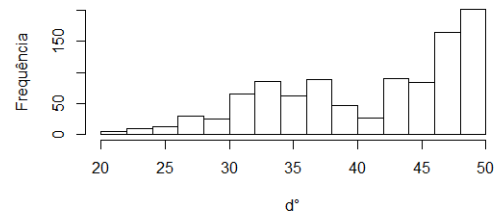
((d)) Número de nós

Figura 20 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 7 rotas de Mandl [1980]

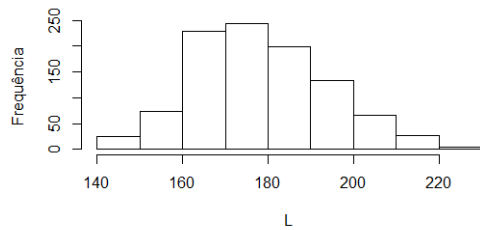
Fonte: Elaborado pelo autor



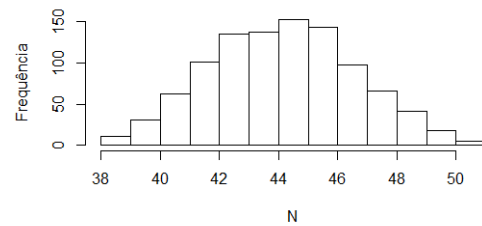
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos



((d)) Número de nós

Figura 21 – Resultados das 1000 amostras iniciais do cenário com 8 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.1.1.2 Parâmetros de execução

O algoritmo será executado para cada uma das amostras construídas com os parâmetros definidos na Tabela 17. Por fim, os resultados são discutidos e analisados na Seção 4.6.1.

Parâmetro de execução	Valor
R_{min}	55%
I_{max}	140%
IN_{max}	∞

Tabela 17 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.1.2 Rede de Mumford [2013] com 127 nós

4.5.1.2.1 Determinação das rotas iniciais

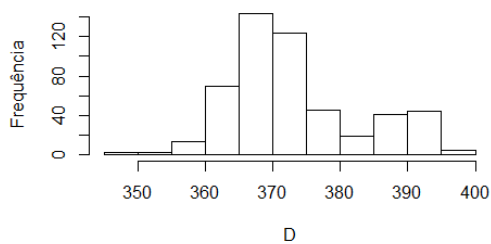
Como na rede anterior, os cenários iniciais não são disponibilizados. Dessa forma, é necessário criá-los, já que o algoritmo depende dessas entradas. Por fim, a determinação delas segue as restrições listadas na Tabela 18.

Parâmetro de construção	Cenário 60
Número de amostras	500
d^0_{max}	50
N_{min}	665
N_{max}	900
L_{min}	2453.34 km
L_{max}	3747.51 km

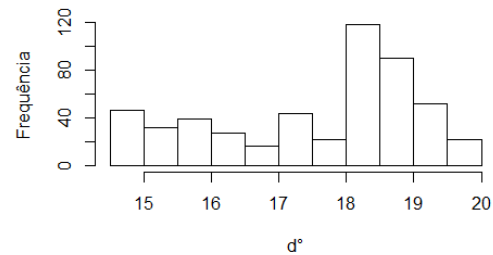
Tabela 18 – Parâmetros de construção dos cenários iniciais da rede de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

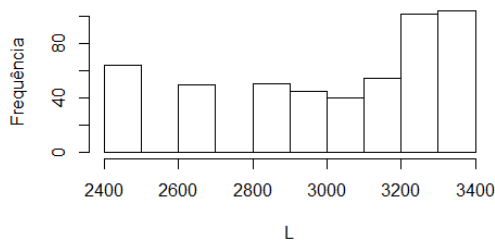
O número de amostras construídas foi de 500 devido à sua maior dimensão e tempo de processamento. Portanto, é menor que o adotado pela rede anterior. A porcentagem da demanda atendida d^0 foi limitado a 50%, mas como será apresentado, não ultrapassaram a barreira dos 20%. Por fim, a Figura 22 descreve as suas principais métricas graficamente.



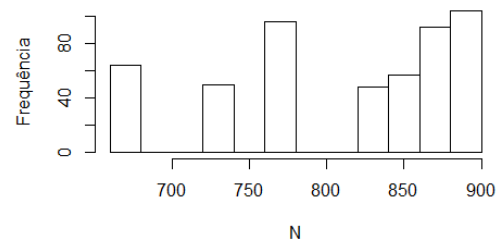
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos



((d)) Número de nós

Figura 22 – Resultados das 500 amostras iniciais do cenário com 60 rotas de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

Através da Figura 22(a), nota-se que o número de passageiros transportados por quilômetros dos cenários construídos não ultrapassa os 500. Já na Figura 22(b) a demanda atendida sem transferência não ultrapassa os 20%. Além disso, na Figura 22(c) a extensão dos cenários está entre 2400 km e 3400km. Por fim, a Figura 22(d) mostra o número de nós dos cenários.

4.5.1.2.2 Parâmetros de execução

Esta seção descreve os parâmetros de execução do algoritmo para cada um dos 500 cenários construídos. Sendo assim, a Tabela 19 os expõe. A taxa mínima de vértices semelhantes foi estabelecida em 70%. E a taxa máxima de crescimento está limitada a 120%. Por fim, o número máximo de iterações não foi limitado, uma vez que poderá executar até não ser mais possível realizar otimização.

Parâmetro de execução	Valor
R_{min}	70%
I_{max}	120%
IN_{max}	∞

Tabela 19 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2 2° estratégia

4.5.2.1 Redes de Maceió/AL

Tal base disponibilizou as rotas utilizadas pelos usuários. Por isso, não haverá necessidade de construí-las. Porém, como possui uma dimensão grande, não poderá ser aplicada em outros cenários, uma vez que o tempo de processamento seria proibitivo. Portanto, somente será testado no disponibilizado.

4.5.2.1.1 Determinação das rotas iniciais

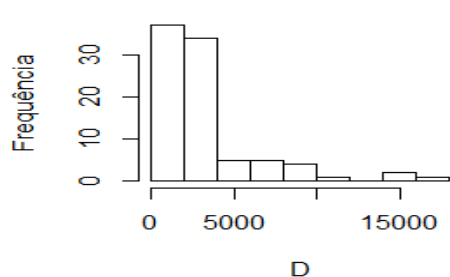
Diferente das outras bases, a comparação dos seus resultados focará em uma visão unitária das rotas, e não em uma macro. Como as outras possuíam muitos cenários, não havia possibilidade de descrevê-las individualmente. Por fim, a análise é realizada considerando a metade dos percursos, pois o algoritmo não aceita rotas circulares. Porém, antes de descrevê-las, a Tabela 20 realiza uma análise preliminar. Através dela, percebe-se que ainda há muito a melhorar. Por exemplo, apenas 13% da população tem sua demanda atendida diretamente, entre outros problemas.

Já a Figura 23 apresenta graficamente os valores das métricas para cada rota. A Figura 23(a) constatou que a quantidade de passageiros transportados por cada uma ficou próxima de 5000 usuários por quilômetro. Já a Figura 23(b) evidencia que os graus de cobertura residem abaixo de 1%. Enquanto a Figura 23(c) constata que poucas possuem mais de 30, a maioria está entre 1 e 30 quilômetros. Por fim, a Figura 23(d) indica que a quantidade de nós delas está limitada a no máximo 30.

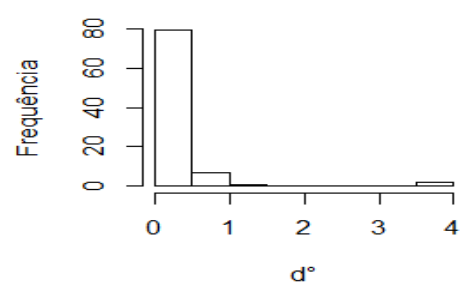
Métrica	Valor
D	1611.48
d^0	13.66
L	1546.81
N	3517

Tabela 20 – Descrição do cenário inicial da cidade de Maceió/AL

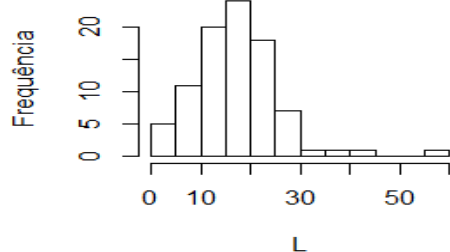
Fonte: Elaborado pelo autor



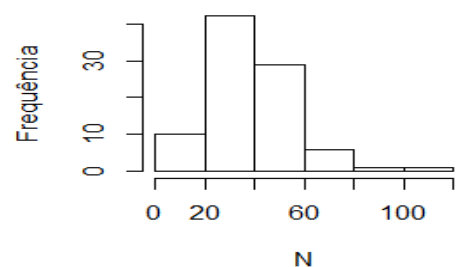
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos



((d)) Número de nós

Figura 23 – Resultados das 88 rotas iniciais de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2.1.2 Parâmetros de execução

A sua execução é demorada devido à sua dimensão. Por isso, só foram efetuadas três iterações (IN). Entretanto, mesmo assim, o resultado atingiu patamares satisfatórios com um custo de mudanças baixo, pois ficaram limitadas a $R_{min} < 80\%$. Já a métrica I_{max} permite um aumento de até 20% dos percursos bases. Por fim, a Tabela 21 agrupa essas informações.

Parâmetro de execução	Valor
R_{min}	80%
I_{max}	120%
IN_{max}	3

Tabela 21 – Parâmetros de execução do experimento na rede de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 Resultados dos experimentos

Essa seção visa apresentar os principais resultados obtidos. Para isso, será dividida por estratégias e redes. Porém, para entendê-los, é preciso conhecer os três tipos cenários a seguir:

Cenários iniciais: São as entradas do algoritmo. As duas primeiras redes não as disponibilizam. Por isso, precisaram ser construídas. Já a última as possui. Portanto, não foi necessário para ela.

Cenários finais: São todos percursos modificados da última iteração. Como explicado, o algoritmo otimiza incrementalmente a cada iteração. Portanto, o seu número varia de amostra para amostra. Por isso, decidiu-se analisar somente os resultados finais (aqueles que não podem ser mais melhorados).

Literatura: São os resultados da literatura para as duas primeiras bases. Além disso, como não disponibilizaram os percursos bases, o custo não foi aferido.

De modo geral, para verificar a qualidade dos resultados, serão realizadas comparações entre esses tipos de cenários utilizando as métricas da Seção 4.2. Sendo assim, terão os seguintes formatos:

- Comparar os **cenários finais** com os da **literatura**:
 - *Eficácia*: Comparar a eficácia do novo algoritmo com os existentes;
 - *Custo*: Como a literatura não fornece os percursos iniciais, não pode ser computado .
- Comparar os **cenários iniciais** com os **finais**:
 - *Eficácia*: Comparar os cenários iniciais e finais para verificar suas melhorias;
 - *Custo*: Avalia a evolução do custo para alcançar o cenário final.

O primeiro caso de teste somente pode ser aplicado para as rede de Mandl [1980] e Mumford [2013]. Porém, testes hipóteses só são serão realizados na primeira base, pois é a única com muitos trabalhos relacionados. Já o segundo pode ser avaliado para todos resultados em razão da comparação ser entre os do próprio algoritmo.

Observa-se também que para cada iteração do algoritmo em uma amostra, é obtido um valor de R . Por isso, para facilitar a sua explicação, será considerada a taxa média de semelhança \bar{R} de cada uma para não tornar sua visualização gráfica complexa. Além disso, é exposto o histograma com o número de iterações para auxiliá-la. Com isso, é possível descobrir a quantidade delas para convergir para um estado ótimo.

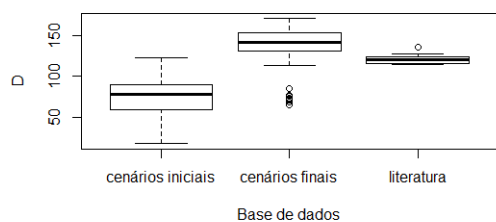
A evolução da eficácia de cada base poderá ser visualizada através de gráficos *boxplot* para cada uma das métricas. Já o custo das soluções será analisado através de histogramas, mas somente no segundo caso de comparação. Por fim, a análise será dividida em dois passos. O primeiro é a descrição textual dos resultados. O segundo apresenta os gráficos contendo comparações.

4.6.1 1° estratégia

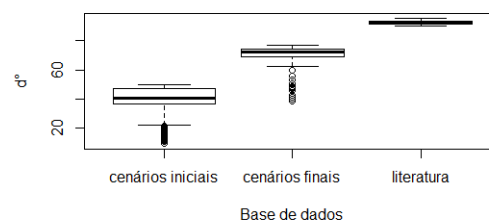
4.6.1.1 Rede de Mandl [1980]

Os resultados da eficácia dos quatro cenários possíveis estão descritos graficamente nas Figuras 24, 25, 26 e 27. Por conseguinte, como são semelhantes, será realizada uma análise englobando todos. Todavia, aspectos específicos de cada um serão declarados explicitamente.

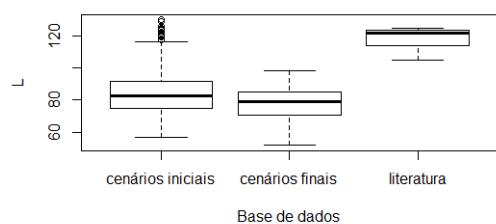
A partir deles, conclui-se que apenas a demanda atendida sem transferência d^0 não conseguiu resultados superiores aos da literatura, indicando um grau de abrangência menor. Entretanto, no cenário com 8 rotas o seu valor se aproximou muito ao patamares deles. Além disso, seu valor elevado gera maior custo para o operador, que precisa aumentar os tamanhos dos percursos L . Enquanto, o algoritmo os reduziu. Já a densidade de viajantes diretos D foi elevada pelo algoritmo. Dessa forma, o baixo valor da primeira variável pode ser compensado por viagens integradas, tendo em vista o crescimento do lucro proporcionado pelo aumento dos passageiros transportados por quilômetros.



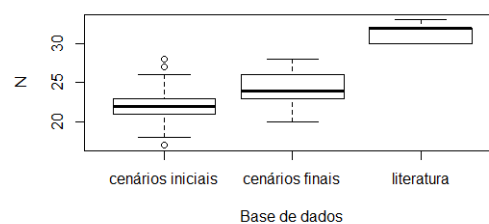
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



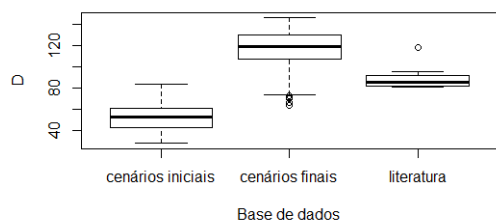
((c)) Tamanho total dos percursos



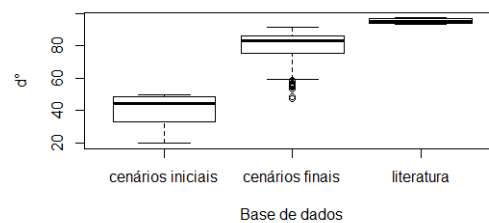
((d)) Número de nós

Figura 24 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 4 rotas de Mandl [1980]

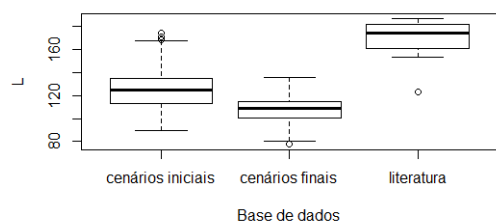
Fonte: Elaborado pelo autor



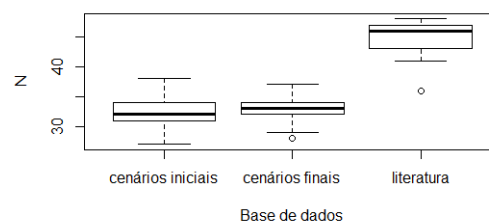
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



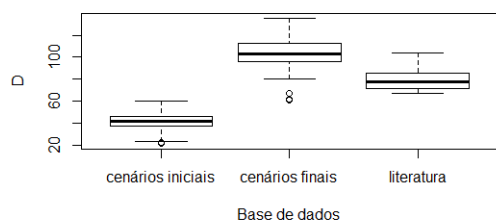
((c)) Tamanho total dos percursos



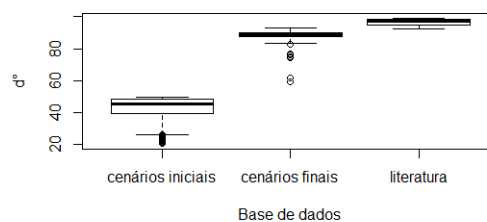
((d)) Número de nós

Figura 25 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 6 rotas de Mandl [1980]

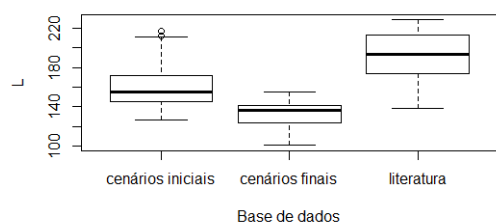
Fonte: Elaborado pelo autor



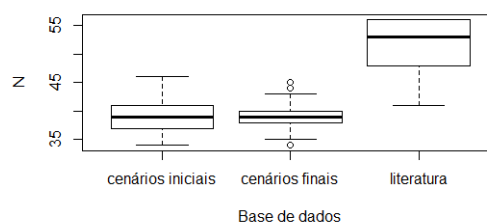
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



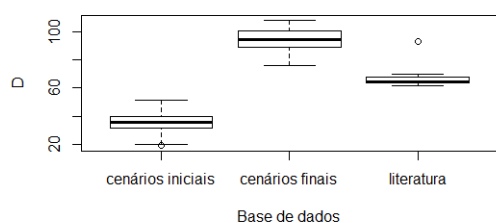
((c)) Tamanho total dos percursos



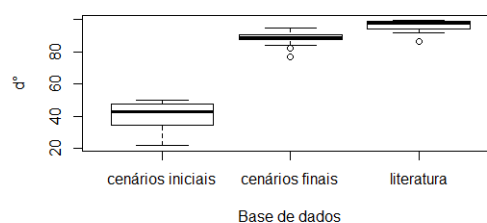
((d)) Número de nós

Figura 26 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 7 rotas de Mandl [1980]

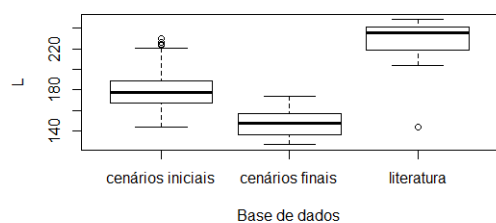
Fonte: Elaborado pelo autor



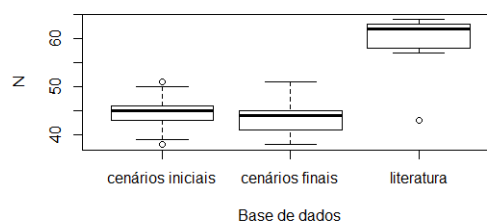
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos

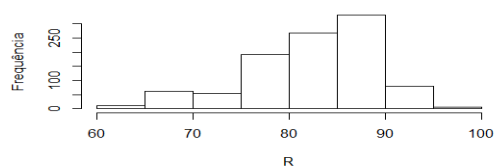


((d)) Número de nós

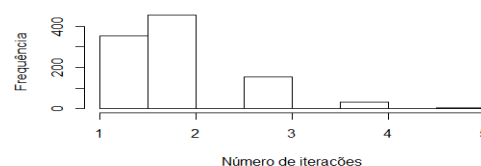
Figura 27 – Comparação entre diferentes bases no cenário com 8 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

Os custos dos resultados do algoritmo também foram medidos para os quatro cenários. As Figuras 28, 29, 30 e 31 mostram que a taxa média de vértices semelhantes \bar{R} ultrapassa os 60% e se concentra principalmente entre 80% e 90%. Portanto, o custo das mudanças alcançou patamares aceitáveis. Além disso, constata-se que o número de iterações também foi um fator favorável, pois não passaram de 6 para o convergimento da solução para um estado ótimo. Dessa forma, o tempo para alcançá-la é curto.



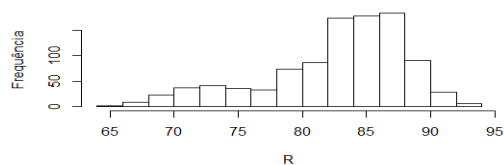
((a)) Taxa média de vértices semelhantes por otimização



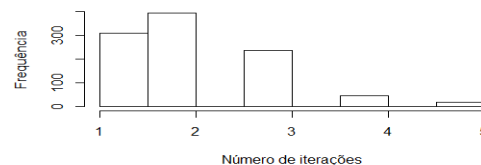
((b)) Número de iterações utilizadas para otimização

Figura 28 – Custo dos resultados nos cenários com 4 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor



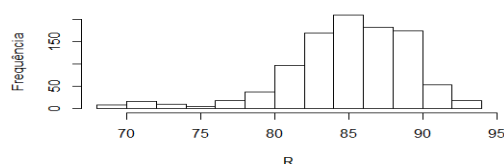
((a)) Taxa média de vértices semelhantes por otimização



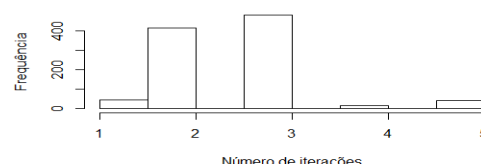
((b)) Número de iterações utilizadas para otimização

Figura 29 – Custo dos resultados nos cenários com 6 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor



((a)) Taxa média de vértices semelhantes por otimização



((b)) Número de iterações utilizadas para otimização

Figura 30 – Custo dos resultados nos cenários com 7 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

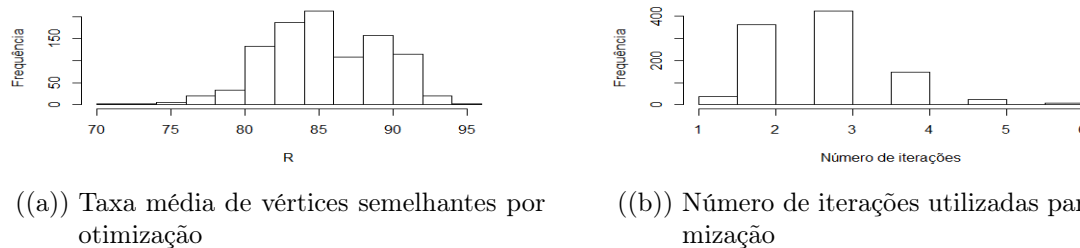


Figura 31 – Custo dos resultados nos cenários com 8 rotas de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

Finalizada a análise textual e gráfica, será descrito o teste de hipótese dos resultados do algoritmo e da literatura para as três métricas de eficácia. Sendo assim, o objetivo disso é verificar se resultado do primeiro é superior aos do segundo. Entretanto, não foi possível para o custo por não haver trabalhos para comparação.

Segundo Barbetta et al. [2004], o teste para média serve para verificar se uma variável da população é, em média, igual a certo valor μ_0 . Por fim, um teste de hipótese bilateral possui a seguinte aparência:

$$H_0: \mu = \mu_0 \text{ e } H_1: \mu \neq \mu_0$$

Onde, H_0 é a hipótese nula, e H_1 é alternativa. Para testes unilaterais (à direita ou à esquerda), possui duas formas:

$$H_1: \mu > \mu_0$$

ou $H_1: \mu < \mu_0$

Onde, A hipótese nula será sempre uma igualdade. Além disso, a decisão de aceitar ou rejeitar depende da probabilidade de significância p -valor e também do nível de significância do teste α . O primeiro é definido como a probabilidade estatística dele acusar um resultado tão ou mais distante do esperado [Barbetta et al., 2004]. Já o segundo é a probabilidade tolerável do erro em rejeitar H_0 . Portanto, obtém-se as seguintes regras:

$$\begin{aligned} &\text{Se } p\text{-valor} > \alpha, \text{ então aceitar } H_0 \\ &\text{Se } p\text{-valor} \leq \alpha, \text{ então rejeitar } H_0 \end{aligned}$$

A partir dessa explicação, é possível formular a hipótese nula do presente problema. Para isso, a média esperada da população μ_0 será definida como a média dos resultados finais do algoritmo para as variáveis D , d^0 e L . Já a média da amostra \bar{X} será obtida através da literatura. Ela representa o valor para ser comparado com μ_0 .

A hipótese nula H_0 para os três casos consistirá em verificar se $\mu = \mu_0$. Já a hipótese alternativa H_1 dependerá da variável. Portanto, é necessário definir o objetivo de cada uma. Para as métricas D e d^0 , ela será:

$$H_1: \mu < \mu_0.$$

Essa formulação significa que, caso a hipótese nula seja rejeitada, os valores das variáveis D e d^0 da literatura serão menores que os do algoritmo. Ou seja, os resultados do último são superiores com uma probabilidade de erro α , cujo valor é 5% (ou 0.05). Por fim, já para medida L , ela será:

$$H_1: \mu > \mu_0.$$

Nesse caso, tenta-se provar estatisticamente que os valores das variáveis L do algoritmo são inferiores aos da literatura. Ou seja, os percursos construídos pelo primeiro são menores que os do último.

A Tabela 22 apresenta as médias das populações e das amostras. Ressalta-se que a primeira são os resultados do algoritmo e a segunda da literatura. Além disso, os testes foram aplicados utilizando o ambiente estatístico R², o qual fornece muitas funcionalidades para responder esses tipos de questões.

Cenário	Variável	μ_0 (resultados algoritmo)	\bar{X} (resultados literatura)
4	D	140	122
4	d^0	70	92
4	L	78	119
6	D	117	90
6	d^0	80	95
6	L	108	168
7	D	104	80
7	d^0	88	97
7	L	133	191
8	D	94	68
8	d^0	89	96
8	L	147	223

Tabela 22 – Resultados para realização do teste de hipótese na rede de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

A aplicação dos testes no R é muito simples. Para isso, é necessário possuir os resultados das amostras, e o valor da média esperada para a população. Também precisa definir o tipo de hipótese alternativa. Porém, antes de apresentar os seus comandos, serão explicadas algumas terminologias.

As amostras serão denominada de *literature_x*, onde x indica o cenário. Ou seja, pode ser 4, 6, 7 e 8. Já para obter os valores das métricas, basta utilizar as seguintes

² <https://www.r-project.org/>

expressões: $literature_x\$D$, $literature_x\$d0$ ou $literature_x\$L$. Enquanto, para obter as médias esperadas, será utilizada a função *mean* nos resultados da última iteração do algoritmo. Para referenciá-los, será utilizado os dados $last_result_x$, onde x possui a mesma semântica do caso anterior. Por fim, para obter os valores das variáveis, basta fazer: $last_result_x\$D$, $last_result_x\$d0$ ou $last_result_x\$L$. Por fim, para executar teste de hipótese, devem ser invocadas as seguintes instruções:

```
t.test(literature_x$D, mu = mean(last_result_x$D), alternative = "less", conf.level = 0.95)
t.test(literature_x$d0, mu = mean(last_result_x$d0), alternative = "less", conf.level = 0.95)
t.test(literature_x$L, mu = mean(last_result_x$L), alternative = "greater", conf.level = 0.95)
```

Esses testes precisaram ser executados para cada um dos cenários. Ou seja, 12 vezes. Como explicado, a rejeição das hipóteses nulas está condicionada aos resultados de p -valor. Portanto, o objetivo consiste em verificá-los para concluir a hipótese aceita. Por conseguinte, a Tabela 23 indica seus valores e as conclusões. Nela, para facilitar o entendimento, H_0 e H_1 foram traduzidas para as métricas, em vez dos termos μ e μ_0 . Além disso, nota-se que os subscritos L e A das variáveis estão denotando se são resultados do algoritmo ou da literatura. Por exemplo, D_A , d_A^0 e L_A são os do primeiro. Enquanto D_L , d_L^0 e L_L são os do segundo.

Cenário	Variável	H_0	H_1	p -valor	resultado
4	D	$\overline{D}_L = \overline{D}_A$	$\overline{D}_L < \overline{D}_A$	8.036e-05	Rejeita H_0
4	d^0	$\overline{d}_L^0 = \overline{d}_A^0$	$\overline{d}_L^0 < \overline{d}_A^0$	1	Aceita H_0
4	L	$\overline{L}_L = \overline{L}_A$	$\overline{L}_L > \overline{L}_A$	5.139e-07	Rejeita H_0
6	D	$\overline{D}_L = \overline{D}_A$	$\overline{D}_L < \overline{D}_A$	0.0002384	Rejeita H_0
6	d^0	$\overline{d}_L^0 = \overline{d}_A^0$	$\overline{d}_L^0 < \overline{d}_A^0$	1	Aceita H_0
6	L	$\overline{L}_L = \overline{L}_A$	$\overline{L}_L > \overline{L}_A$	4.158e-05	Rejeita H_0
7	D	$\overline{D}_L = \overline{D}_A$	$\overline{D}_L < \overline{D}_A$	0.0004122	Rejeita H_0
7	d^0	$\overline{d}_L^0 = \overline{d}_A^0$	$\overline{d}_L^0 < \overline{d}_A^0$	1	Aceita H_0
7	L	$\overline{L}_L = \overline{L}_A$	$\overline{L}_L > \overline{L}_A$	0.0003865	Rejeita H_0
8	D	$\overline{D}_L = \overline{D}_A$	$\overline{D}_L < \overline{D}_A$	9.302e-05	Rejeita H_0
8	d^0	$\overline{d}_L^0 = \overline{d}_A^0$	$\overline{d}_L^0 < \overline{d}_A^0$	0.9984	Aceita H_0
8	L	$\overline{L}_L = \overline{L}_A$	$\overline{L}_L > \overline{L}_A$	0.0002181	Rejeita H_0

Tabela 23 – Resultados do teste de hipótese para média na rede de Mandl [1980]

Fonte: Elaborado pelo autor

A primeira e a segunda coluna indicam o cenário e a métrica analisada. Já a coluna p -valor, a probabilidade de significância do teste. Enquanto a última informa a hipótese aceita. Se p -valor for menor que $\alpha = 0.05$, então hipótese H_0 é rejeitada. Portanto, a hipótese alternativa é admissível estatisticamente. As rejeições estão destacada em azul, já o contrário em cor vermelha. Por fim, através desses resultados, conclui-se que:

- VF1:** Os resultados do algoritmo para densidade de viajantes diretos D são superiores aos da literatura;
- VF2:** Os resultados do algoritmo para os tamanhos dos percursos L são superiores aos da literatura;
- VF3:** Os resultados do algoritmo para as demanda atendida sem transferência d^0 foram inferiores aos da literatura;
- VF4:** O algoritmo foi eficaz (na maioria das métricas) e reduz o custo das soluções.

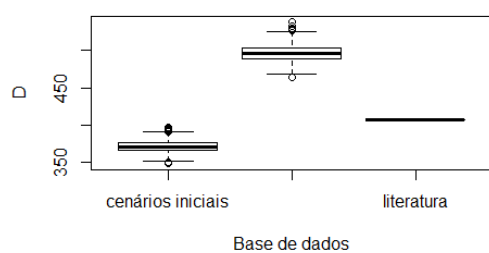
Por fim, concluí-se que o algoritmo consegue gerar resultados satisfatórios tanto para eficácia como para o custo. Ele se mostrou superior na maioria dos aspectos analisados.

4.6.1.2 Rede de Mumford [2013] com 127 nós

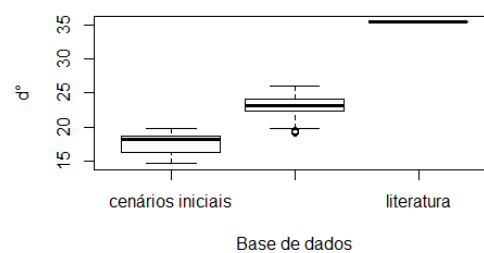
Esta seção expõe os resultados obtidos em uma das rede de Mumford [2013]. Para isso, serão realizadas análises dos resultados iniciais, finais e os da literatura. Além disso, igual a base anterior, será examinada primeiro a eficácia da abordagem, e em seguida o custo.

A Figura 32 apresenta os gráficos da eficácia. Cada um contém três resultados. O primeiro são os do sistema inicial. Já o segundo são os do algoritmo na última iteração. Enquanto o último são os da literatura. Sendo assim, a Figura 32(a) mostra graficamente que a densidade de viajantes direto D do algoritmo é superior a alcançada pela literatura. Entretanto, o algoritmo não superou a literatura na demanda atendida sem transferências d^0 exposta na Figura 32(b). Apesar dessa deficiência, o aumento de D e a diminuição de L visualizada na Figura 32(c) compensam tal limitação. Além disso, nota-se que o tamanho dos percursos são bem menores que os da literatura, que é reforçada pela quantidade de nós exposta na Figura 32(d).

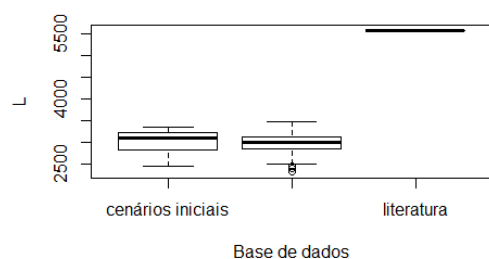
Finalizada a análise da eficácia da abordagem, será realizado o estudo dos custos apresentados na Figura 33. Ressalta-se que eles só foram computados para os resultados do algoritmo, já que a literatura não disponibilizou os percursos iniciais. A Figura 33(a) apresenta os valores da taxa média de semelhança \bar{R} . Através da análise, constata-se que gravitou entre 75% e 90%. Ou seja, o aumento da eficácia exigiu poucas modificações. Já Figura 33(b) expõe o número de iterações para alcançar a última iteração. Ele ficou concentrado entre duas e três. Portanto, o algoritmo alcança resultados satisfatórios em pouco tempo.



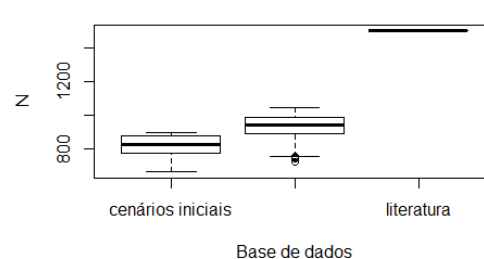
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



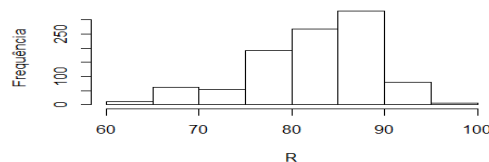
((c)) Tamanho total dos percursos



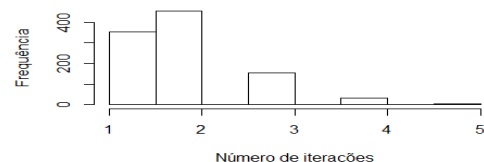
((d)) Número de nós

Figura 32 – Resultado de diferentes bases no cenário com 60 rotas de Mumford [2013]

Fonte: Elaborado pelo autor



((a)) Taxa média de vértices semelhantes por otimização



((b)) Número de iterações utilizadas para otimização

Figura 33 – Custo dos resultados nos cenários com 60 rotas de Mumford [2013]

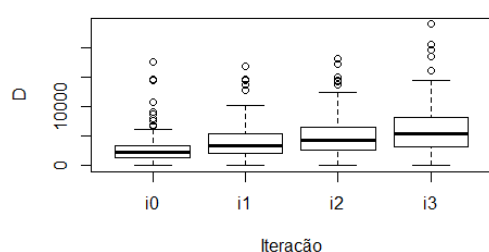
Fonte: Elaborado pelo autor

4.6.2 2° estratégia

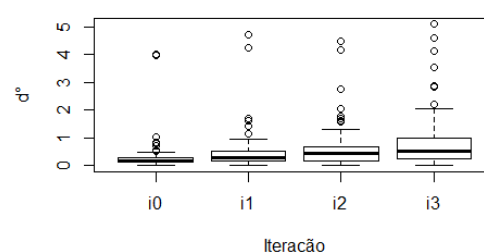
4.6.2.1 Redes de Maceió/AL

A execução do algoritmo foi limitada a apenas três iterações. Porém, mesmo assim, o desempenho foi satisfatório. Por conseguinte, a análise consistiu em examinar os resultados de cada iteração. Além disso, devido à ausência de trabalhos relacionados, não foi possível aplicar o teste de hipótese para média. Por fim, os primeiros resultados analisados serão as métricas de eficácia para cada cenário e iteração.

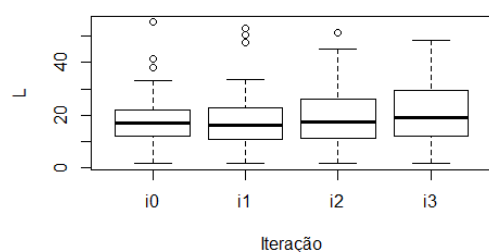
A Figura 34 resume a eficácia de cada rota. Os percursos iniciais são referenciados por $i0$ e as iterações por $i1$, $i2$ e $i3$. Sendo assim, a Figura 34(a) mostra que a cada iteração a densidade de viajantes diretos D cresce. Já a Figura 34(b) evidencia o crescimento da demanda atendida sem transferências d^0 . Enquanto a Figura 34(c) expõe o aumento do tamanho dos percursos L . Porém, na iteração $i1$ se manteve estável. Por fim, a Figura 34(d) mostra a evolução do número de nós N ao longo das iterações. Portanto, conclui-se que as duas primeiras medidas obtiveram uma performance muito boa mesmo com um número reduzido de iterações.



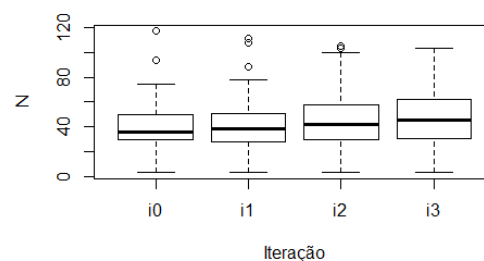
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos

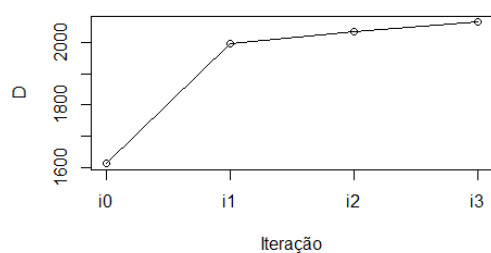


((d)) Número de nós

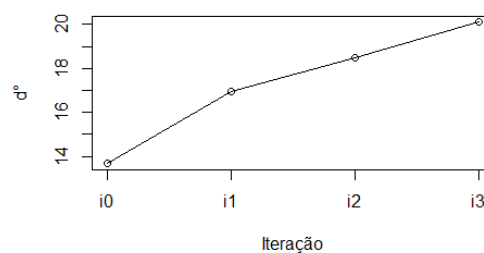
Figura 34 – Resultados de cada iteração na rede de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

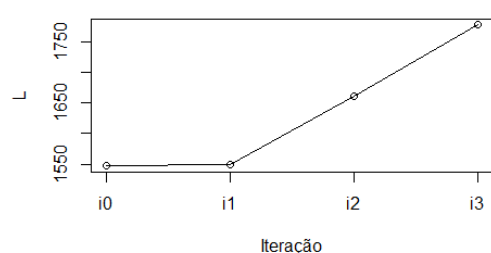
Finalizada a descrição individual das rotas, será apresentada uma análise macro da eficácia. A Figura 35 condensa todos resultados. Sendo assim, a Figura 35(a) mostra que D aumentou aproximadamente de 1600 para 2000 na última iteração. Ou seja, conseguiu-se aumentar 400 passageiros transportados por quilômetros com poucas modificações. Entretanto, na primeira iteração já existe um crescimento significativo apesar da estabilização do tamanho dos percursos L . Já a Figura 35(b) expõe que a d^0 saiu dos 14% para quase 20% em quatro iterações. Por fim, a Figura 35(c) e Figura 35(d) evidenciam que L e N cresceram modestamente quando comparadas aos desempenhos das duas primeiras métricas. Aumentou-se em média 2 mil quilômetros entre a primeira iteração e a última. Entretanto, é justificado pelo crescimento das duas primeiras variáveis.



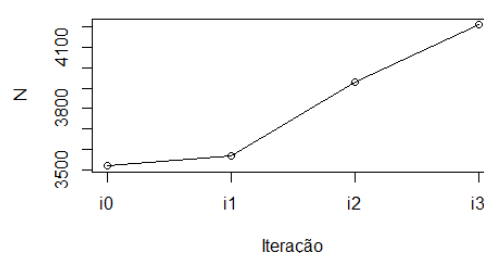
((a)) Densidade de viajantes diretos



((b)) Demanda atendida sem transferências



((c)) Tamanho total dos percursos



((d)) Número de nós

Figura 35 – Resultados resumidos de cada iteração na rede de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

Os últimos resultados são os custos indicativos do grau de semelhança. Para isso, serão realizadas comparações entre: $i0$ e $i1$, $i1$ e $i2$ e $i2$ e $i3$. A Figura 36 os apresenta através de gráficos em pizza. Nela, a região azul é a semelhança com o cenário anterior e a vermelha é a diferença. Como os resultados são semelhantes, não será discutido cada um dos gráficos. Por fim, observa-se que a taxa de semelhança R durante as iterações circundaram entre 78% e 87% em todos gráficos. Portanto, o aumento da eficácia foi alcançado com um pequeno custo, já que a maior parte da estrutura existentes foram mantidas.

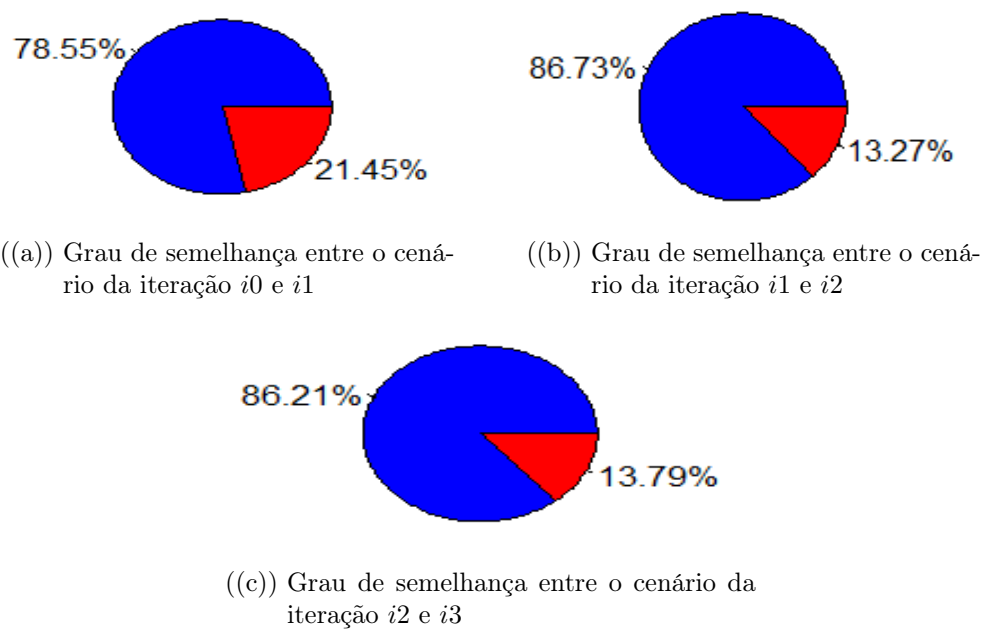


Figura 36 – Grau de semelhança entre os resultados da rede de Maceió/AL

Fonte: Elaborado pelo autor

5 CONCLUSÃO

No início do presente trabalho se buscou compreender como a otimização de transporte público funciona. Realizou-se uma revisão sistemática na Seção 2 para esse fim. Através dela constatou-se que nenhum dos 34 trabalhos analisados consideravam o sistema de transporte público atual. Ou seja, eles descartam o padrão de viagem que é conhecido pelos usuários, o que dificulta a aceitação por parte deles. Desse modo, dificilmente esses novos projetos seriam usados em contexto prático. Portanto, tais algoritmos não são viáveis em propor soluções para ambientes operacionais reais.

A partir dessa constatação, a presente proposta criou como objetivo a mitigação dessa deficiência encontrada nos trabalhos estudados. Para isso, foi construído o novo método de otimização, que é intitulado de **otimização incremental de transporte público**. Esse algoritmo, diferente dos analisados, considera os percursos existentes do sistema de transporte. Ele realiza isso utilizando tais rotas como entrada para o seu algoritmo. Dessa forma, ele propõe mudanças incrementais no sistema, o que irá permitir ao usuário maior facilidade para aceitar o novo projeto. Como consequência, o algoritmo também irá propor mudanças no projeto das rotas que realmente poderão ser utilizadas em contexto prático. A Seção 3 apresenta detalhadamente cada parte desse novo método de otimização.

A validação dessa nova técnica englobou sua avaliação em três bases de dados diferentes. A primeira foi a de Mandl [1980], o qual é o *benchmark* mais conhecido para esse tipo de problema. Ele foi utilizado por muitos dos trabalhos analisados. Dessa forma, é possível comparar os resultados do algoritmo incremental com outras técnicas. Porém, a rede dele é pequena. Por isso foi necessário utilizar uma segunda base, que é a de Mumford [2013]. Ele tem uma rede com mais de 100 nós. Entretanto, ele não possui muitos trabalhos que utilizaram sua rede. Por fim, a última base testada foi a da cidade de Maceió/AL. Ela possui mais de 1000 nós, e foi utilizada para verificar o desempenho do algoritmo em redes reais.

A Seção 4 descreve os passos e resultados obtidos com experimento. Nela constatou-se que o algoritmo apresenta resultados satisfatórios considerando o novo modelo de otimização. Apenas uma medida de efetividade não foi tão eficiente quanto os resultados da literatura. Entretanto, isso é compensado pelas outras medidas bem avaliadas. Portanto, conclui-se, o algoritmo conseguiu otimizar e melhorar a efetividade das rotas iniciais de transporte públicos. Toda essa melhoria foi alcançada considerando as rotas iniciais do sistema, o que possibilitou uma otimização com poucas mudanças. Desse modo, o algoritmo pode ser utilizado em contexto real, diferente dos analisados.

5.0.1 Trabalhos futuros

Como trabalho futuro se propõe a construção do mesmo algoritmo utilizando uma abordagem não gulosa. Nesse sentido, o Apêndice C.2 já esboça o início dessa solução. Entretanto, ela está incompleta. A ideia é construir um algoritmo mais eficiente e que precise de menos tempo para produzir os resultados.

Outro trabalho futuro pode ser a construção do algoritmo considerando a quebra das rotas ou supressão de algumas. Dessa forma, ao realizar varias iterações do algoritmo, será possível garantir que em algum momento alcance os mesmos resultados das abordagens da literatura.

REFERÊNCIAS

aaaa.

- R. O. Arbex and C. B. da Cunha. Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *TRANSPORTATION RESEARCH PART B-METHODOLOGICAL*, 81(2, SI):355–376, NOV 2015. ISSN 0191-2615. doi: <{10.1016/j.trb.2015.06.014}>.
- M. H. Baaj and H. S. Mahmassani. Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(1):31–50, 1995.
- M. Ball, C. Barnhart, G. Nemhauser, and A. Odoni. Handbooks in operations research and management science: Transportation, 2007.
- P. A. Barbetta, M. M. Reis, and A. C. Bornia. *Estatística: para cursos de engenharia e informática*, volume 3. Atlas São Paulo, 2004.
- V. R. Basili. Software modeling and measurement: the goal/question/metric paradigm. Technical report, 1992.
- M. Bielli, M. Caramia, and P. Carotenuto. Genetic algorithms in bus network optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(1):19–34, 2002.
- J. J. Blum and S. E. Edsell. Selective solution pool pruning in multi-agent optimization systems for the transit route network design problem. In *2011 14TH INTERNATIONAL IEEE CONFERENCE ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS (ITSC)*, IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems-ITSC, pages 710–715, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2011. IEEE; George Washington Univ (GWU), Sch Engn & Appl Sci; IEEE ITS Soc; Ctr Intelligent Syst Res (CISR); FHWA/NHTSA Natl Crash Anal Ctr (NCAC), IEEE. ISBN 978-1-4577-2197-7. 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Campus George Washington Univ (GWU), Washington, DC, OCT 05-07, 2011.
- H. Cancela, A. Mauttone, and M. E. Urquhart. Mathematical programming formulations for transit network design. *TRANSPORTATION RESEARCH PART B-METHODOLOGICAL*, 77:17–37, JUL 2015. ISSN 0191-2615. doi: <{10.1016/j.trb.2015.03.006}>.
- P. Chakroborty. Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *COMPUTER-AIDED CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING*, 18(3):184–200, MAY 2003. ISSN 1093-9687. doi: <10.1111/1467-8667.00309>.
- P. Chakroborty and T. Wivedi. Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms. *Engineering optimization*, 34(1):83–100, 2002.
- E. Cipriani, S. Gori, and M. Petrelli. Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1):3–14, 2012.

- K. M. Curtin and S. Biba. The transit route arc-node service maximization problem. *European Journal of Operational Research*, 208(1):46–56, 2011.
- Dorigo. *Optimization, learning and natural algorithms*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy, 1992.
- L. Fan and C. L. Mumford. A metaheuristic approach to the urban transit routing problem. *JOURNAL OF HEURISTICS*, 16(3, SI):353–372, JUN 2010. ISSN 1381-1231. doi: <10.1007/s10732-008-9089-8>.
- L. Fan, C. L. Mumford, and D. Evans. A simple multi-objective optimization algorithm for the urban transit routing problem. In *2009 IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, VOLS 1-5*, IEEE Congress on Evolutionary Computation, pages 1–7, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2009. IEEE, IEEE. ISBN 978-1-4244-2958-5. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Trondheim, NORWAY, MAY 18-21, 2009.
- W. Fan and R. B. Machemehl. Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results. Technical report, 2004.
- W. Fan and R. B. Machemehl. Tabu search strategies for the public transportation network optimizations with variable transit demand. *COMPUTER-AIDED CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING*, 23(7):502–520, OCT 2008. ISSN 1093-9687. doi: <10.1111/j.1467-8667.2008.00556.x>.
- W. Fan, Z. Gurmu, and E. Haile. A bi-level metaheuristic approach to designing optimal bus transit route network. In *2013 IEEE 3RD ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER TECHNOLOGY IN AUTOMATION, CONTROL AND INTELLIGENT SYSTEMS (CYBER)*, IEEE Annual International Conference on Cyber Technology in Automation Control and Intelligent Systems, pages 308–313, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2013. IEEE; IEEE Robot & Automat Soc; City Univ Hong Kong; Nanjing Univ Sci & Technol, IEEE. ISBN 978-1-4799-0610-9; 978-1-4799-0612-3. 3rd IEEE Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent System (CYBER), Nanjing, PEOPLES R CHINA, MAY 26-29, 2013.
- R. Z. Farahani, E. Miandoabchi, W. Y. Szeto, and H. Rashidi. A review of urban transportation network design problems. *European Journal of Operational Research*, 229(2): 281–302, 2013.
- C. Flaut, F. Ghionea, and M. Parvan. Optimization of urban transportation network. In L. Vladareanu, V. Chiroiu, P. Bratu, and I. Magheti, editors, *PROCEEDINGS OF THE 9TH WSEAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON MATHEMATICS & COMPUTERS IN BUSINESS AND ECONOMICS (MCBE '08): MATHEMATICS AND COMPUTERS IN BUSINESS AND ECONOMICS*, Recent Advances in Computer Engineering, pages 111–115, AG LOANNOU THEOLOGOU 17-23, 15773 ZOGRAPHOU, ATHENS, GREECE, 2008. WSEAS; Academia Romana; Natl Univ Res Council; Univ Politehn Bucharest; Tech Univ Cluj Napoca; Execut Agcy Higher Educ & Res Funding, WORLD SCIENTIFIC AND ENGINEERING ACAD AND SOC. ISBN 978-960-6766-76-3. 9th WSEAS International Conference on Mathematics and Computers in Business and Economics, Bucharest, ROMANIA, JUN 24-26, 2008.

- J. Hu, X. Shi, J. Song, and Y. Xu. Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithms. In L. Wang, K. Chen, and Y. Ong, editors, *ADVANCES IN NATURAL COMPUTATION, PT 2, PROCEEDINGS*, volume 3611 of *LECTURE NOTES IN COMPUTER SCIENCE*, pages 1089–1100, HEIDELBERGER PLATZ 3, D-14197 BERLIN, GERMANY, 2005. Xiangtang Univ; IEEE Circuits & Syst Soc; IEEE Computat Intelligence Soc; IEEE Control Syst Soc; Int Neural Network Soc; European Neural Network Soc; Chinese Assoc Artificial Intelligence; Japanese Neural Network Soc; Int Fuzzy Syst Assoc; Asia Pacific Neural Network Assembly; Fuzzy Math & Syst Assoc China; Hunan Comp Federat, SPRINGER-VERLAG BERLIN. ISBN 3-540-28325-0. 1st International Conference on Natural Computation (ICNC 2005), Changsha, PEOPLES R CHINA, AUG 27-29, 2005.
- IPEA. Comunicado ipea de n 94. <http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/comunicado/110525_comunicadoipea94.pdf>.
- P. N. Kechagiopoulos and G. N. Beligiannis. Solving the urban transit routing problem using a particle swarm optimization based algorithm. *APPLIED SOFT COMPUTING*, 21:654–676, AUG 2014. ISSN 1568-4946. doi: <10.1016/j.asoc.2014.04.005>.
- S. Keele. Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. In *Technical report, Ver. 2.3 EBSE Technical Report. EBSE*. 2007.
- K. Kepaptsoglou and M. Karlaftis. Transit route network design problem: review. *Journal of transportation engineering*, 135(8):491–505, 2009.
- F. Kilic and M. Gok. A demand based route generation algorithm for public transit network design. *COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH*, 51:21–29, NOV 2014. ISSN 0305-0548. doi: <10.1016/j.cor.2014.05.001>.
- F. Kiliç and M. Gök. A benchmark proposal for route-planning of urban bus service. In *Engineering of Computer Based Systems (ECBS-EERC), 2015 4th Eastern European Regional Conference on the*, pages 134–137. IEEE, 2015.
- S. Lei, Z. Li, B. Wu, and H. Wang. Research on Multi-objective Bus Route Planning Model Based on Taxi GPS Data. In Xie, B and Xu, X, editor, *2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON CYBER-ENABLED DISTRIBUTED COMPUTING AND KNOWLEDGE DISCOVERY PROCEEDINGS - CYBERC 2016*, pages 249–255, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2016. IEEE Comp Soc; IEEE; Univ Louisville; Beijing Jiaotong Univ; NICL; IEEE Big Data Initiat; INFOBEYOND; Tech Mahindra; at & t; Huawei; IEEE Software Defin Networks Initiat; IEEE Tech Comm Simulat Sci & Technol Elect Informat Control Lab; Sci & Technol Elect Informat Control Lab, IEEE. ISBN 978-1-5090-5154-0. doi: <{10.1109/CyberC.2016.56}>. 8th International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC), Chengdu, PEOPLES R CHINA, OCT 13-15, 2016.
- C. Mandl. Applied network optimization. 1980.
- Y. A. Martynova, Y. A. Martynov, D. B. Mustafina, and V. V. Asmolovskiy. Ant colony algorithm for rational transit network design of urban passenger transport. In *2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL ENGINEERING, AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS (MEACS)*, 345 E 47TH ST, NEW YORK,

- NY 10017 USA, 2015. Inst Elect Elect Engineers; Russian Fdn Basic Res; Tomsk Polytechn Univ; Tomsk IEEE Chapter; Tomsk Polytechn Univ, Inst Phys High Technologies, IEEE. ISBN 978-1-4799-6221-1. doi: <{10.1109/meacs.2014.6986883}>. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), Tomsk, RUSSIA, OCT 16-18, 2014.
- A. Mauttone and M. E. Urquhart. A route set construction algorithm for the transit network design problem. *COMPUTERS & OPERATIONS RESEARCH*, 36(8):2440–2449, AUG 2009. ISSN 0305-0548. doi: <10.1016/j.cor.2008.09.014>.
- M. Michaelis and A. Schöbel. Integrating line planning, timetabling, and vehicle scheduling: a customer-oriented heuristic. *Public Transport*, 1(3):211–232, 2009.
- Y. Mo, J. Deng, and J. Wang. An improvement route generation algorithm for bus network design. In Q. Luo and W. Zheng, editors, *2008 WORKSHOP ON POWER ELECTRONICS AND INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEM, PROCEEDINGS*, pages 199–202, 10662 LOS VAQUEROS CIRCLE, PO BOX 3014, LOS ALAMITOS, CA 90720-1264 USA, 2008. IEEE Comp Soc; IEEE SMC; Guangdong Univ Business Studies; Wuhan Univ Technol; Wuhan Inst Technol; Intelligent Informat Technol Applicat Res Inst; Engn Technol Press, IEEE COMPUTER SOC. ISBN 978-0-7695-3342-1. doi: <10.1109/PEITS.2008.14>. Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System, Guangzhou, PEOPLES R CHINA, AUG 04-05, 2008.
- C. L. Mumford. Simple population replacement strategies for a steady-state multi-objective evolutionary algorithm. In *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, pages 1389–1400. Springer, 2004.
- C. L. Mumford. New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem. In *2013 IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION (CEC)*, pages 939–946, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2013. IEEE; IEEE Computat Intelligence Soc, IEEE. ISBN 978-1-4799-0454-9; 978-1-4799-0453-2. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Cancun, MEXICO, JUN 20-23, 2013.
- M. A. Nayeem, M. K. Rahman, and M. S. Rahman. Transit network design by genetic algorithm with elitism. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C-EMERGING TECHNOLOGIES*, 46:30–45, SEP 2014. ISSN 0968-090X. doi: <{10.1016/j.trc.2014.05.002}>.
- M. Nikolic and D. Teodorovic. Transit network design by bee colony optimization. *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 40(15):5945–5955, NOV 1 2013. ISSN 0957-4174. doi: <10.1016/j.eswa.2013.05.002>.
- M. Nikolic and D. Teodorovic. A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees. *EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS*, 41(16): 7200–7209, NOV 15 2014. ISSN 0957-4174. doi: <10.1016/j.eswa.2014.05.034>.
- A. C. Olivera, M. Frutos, J. A. Carballido, and N. B. Brignole. Bus network optimization with a time-dependent hybrid algorithm. *JOURNAL OF UNIVERSAL COMPUTER SCIENCE*, 14(15):2512–2531, 2008. ISSN 0948-695X.

- M. Owais, M. K. Osman, and G. Moussa. Multi-Objective Transit Route Network Design as Set Covering Problem. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 17(3):670–679, MAR 2016. ISSN 1524-9050. doi: <{10.1109/TITS.2015.2480885}>.
- S. Pattnaik, S. Mohan, and V. Tom. Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 124(4):368–375, 1998.
- F. Pinelli, R. Nair, F. Calabrese, M. Berlingerio, G. Di Lorenzo, and M. L. Sbodio. Data-Driven Transit Network Design From Mobile Phone Trajectories. *IEEE TRANSACTIONS ON INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*, 17(6):1724–1733, JUN 2016. ISSN 1524-9050. doi: <{10.1109/TITS.2015.2496783}>.
- M. Pternea, K. Kepaptsoglou, and M. G. Karlaftis. Sustainable urban transit network design. *TRANSPORTATION RESEARCH PART A-POLICY AND PRACTICE*, 77: 276–291, JUL 2015. ISSN 0965-8564. doi: <{10.1016/j.tra.2015.04.024}>.
- W. Szeto and Y. Wu. A simultaneous bus route design and frequency setting problem for tin shui wai, hong kong. *European Journal of Operational Research*, 209(2):141–155, 2011.
- C. L. Valenzuela. A simple evolutionary algorithm for multi-objective optimization (seamo). In *Evolutionary Computation, 2002. CEC'02. Proceedings of the 2002 Congress on*, volume 1, pages 717–722. IEEE, 2002.
- Q. K. Wan and H. K. Lo. A mixed integer formulation for multiple-route transit network design. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2(4):299–308, 2003.
- O. Y. Xian, M. Chitre, and D. Rus. An approximate bus route planning algorithm. In *PROCEEDINGS OF THE 2013 IEEE SYMPOSIUM ON COMPUTATIONAL INTELLIGENCE IN VEHICLES AND TRANSPORTATION SYSTEMS (CIVTS)*, pages 16–24, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA, 2013. IEEE; IEEE Computat Intelligence Soc, IEEE. ISBN 978-1-4673-5913-9. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Vehicles and Transportation Systems (CIVTS), Singapore, SINGAPORE, APR 16-19, 2013.
- L. Xiaowei, W. Wei, X. Chengcheng, L. Zhibin, and W. Baojie. Multi-objective optimization of urban bus network using cumulative prospect theory. *JOURNAL OF SYSTEMS SCIENCE & COMPLEXITY*, 28(3):661–678, JUN 2015. ISSN 1009-6124. doi: <{10.1007/s11424-015-2049-0}>.
- Z. Yang, B. Yu, and C. Cheng. A parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *COMPUTER-AIDED CIVIL AND INFRASTRUCTURE ENGINEERING*, 22(1):44–55, JAN 2007. ISSN 1093-9687. doi: <10.1111/j.1467-8667.2006.00469.x>.
- A. Zarrinmehr, M. Saffarzadeh, S. Seyedabrishami, and Y. M. Nie. A path-based greedy algorithm for multi-objective transit routes design with elastic demand. *PUBLIC TRANSPORT*, 8(2):261–293, SEP 2016. ISSN 1866-749X. doi: <{10.1007/s12469-016-0131-1}>.

APÊNDICE A – PROCESSO DE PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE URBANO

Esse apêndice tem como objetivo fornecer uma visão geral sobre o funcionamento do processo de planejamento de transporte urbano. Entretanto, o foco principal é o transporte público. Esse planejamento pode ser dividido em quatro macros fases [Farahani et al., 2013, Michaelis and Schöbel, 2009]. Cada fase possui um conjunto de atividades. Por fim, elas são as seguintes:

- **Planejamento estratégico** - Essa etapa está envolvida com decisões infraestruturais de uma rede de transporte planejadas para persistir por um longo período de tempo. Uma de suas responsabilidades é projetar percursos de transportes e determinar suas frequências de operação. Além disso, engloba decisões sobre a construção de novas vias e o aumento da sua capacidade;
- **Planejamento tático** - Suas decisões se preocupam com a utilização efetiva da infraestrutura e recursos existentes da rede urbana de transporte. As suas principais atividades são: definição da frequência dos serviços, criação da tabela de horário dos veículos, determinação do sentido de uma via, alocação de pistas exclusivas, etc. A primeira também está inclusa nessa fase porque variações na demanda de viagens e pequenas alterações nos rotas podem requerer ajustes sua frequência de operação [Ball et al., 2007];
- **Planejamento operacional** - As atividades nessa etapa estão interessadas pelo controle de fluxo e programações de horários. As decisões tomadas nessa fase são consideradas decisões de curto período de tempo. Como exemplos de atividades nessa fase, têm-se a programação dos sinais de trânsito, escalonamento de reparos dos veículos, definições das tabelas de horário dos veículos e tripulação, etc;
- **Controle em tempo real** - Essa fase é responsável por acompanhar os acontecimentos durante a operação do sistema de transporte urbano. Geralmente, esse controle em tempo real utiliza *Global Positioning System (GPS)* para efetuar suas atividades de gerência.

A partir desses níveis de planejamento apresentados, observa-se que há atividades inerentes a cada fase do planejamento. Elas são tradicionalmente executadas em sequência [Michaelis and Schöbel, 2009]. Na Figura 37 é possível visualizar uma sequência de atividades possíveis. Ilustra-se principalmente aquelas preocupadas diretamente com o planejamento do sistema de transporte público. Foram excluídas as atividades de planejamento da infraestrutura urbana como construção de ruas, expansão delas, etc.

Na Figura 37 as atividades do planejamento estratégico estão envoltas pelo retângulo superior, as do planejamento tático pelo retângulo do centro e as operacionais são englobadas pelo retângulo no final da figura. Nota-se que o planejamento estratégico envolve

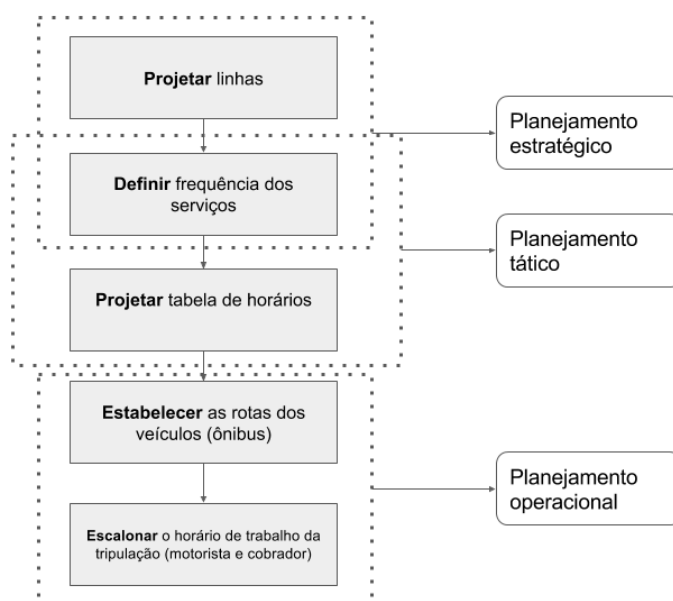


Figura 37 – Atividades de planejamento do transporte público

Fonte: Adaptado de Michaelis and Schöbel [2009]

uma atividade do planejamento tático, já que é uma atividade compartilhada entre esses dois níveis. Por fim, a fase de planejamento operacional possui as atividades responsáveis por gerenciar os veículos e a tripulação, além de controlar os atrasos dos veículos do sistema de transporte público (apesar dessa informação não ter sido expressa na figura).

Algumas das atividades dessas fases de planejamento foram descritas com mais detalhes. A Seção A.1 introduz alguns conceitos sobre projetar linhas e como determinar a frequência de operação desses percursos. Já a Seção A.2 descreve o processo de definição das tabelas de horários. Por fim, A Seção A.3 discute sobre o escalonamento de veículos.

A.1 Projeto de linhas e definição da frequência dos serviços

A primeira atividade consiste em **projetar as linhas**. Ela é responsável por construir rotas para um sistema de transporte público, que são produzidas a partir das mais variadas informações. Por exemplo, é possível construir linhas apenas com uma matriz de demanda ou talvez com as distâncias entre os pontos de ônibus.

Segundo Michaelis and Schöbel [2009], uma linha l é um caminho na rede do transporte público. Em termos práticos, um percurso é uma lista de pontos de ônibus que são percorridos por um veículo. Além disso, após a construção de uma linha l é possível definir a frequência do serviço, que é denominada de fl . Ela informa a quantidade de vezes que o serviço é oferecido ao longo de dado período de tempo T .

Para finalizar essa primeira atividade, serão apresentados alguns princípios que devem ser considerados no planejamento dos percursos de um sistema de transporte público segundo Yang et al. [2007]. Esses princípios são os seguintes:

- Seções com muita demanda de viagem devem ser cobertas primeiro e devem possuir uma grande quantidade de serviços fornecidos (incidência de linhas);
- A taxa não linear deve ser o menor que puder. Essa taxa é descrita como a relação entre a distância da rota e o menor percurso disponível (que pode ser realizado por um modo privado de transporte). Um pequeno valor para essa taxa implica viagens pequenas;
- O serviço deve ser acessível. Ou seja, ele deve atender uma grande área para diminuir as áreas sem serviço. Além de garantir um pequeno percurso de caminhada para os passageiros dos coletivos;
- O tamanho da rota deve estar dentro de um limite. Rotas muito pequenas ou muito grandes devem ser evitadas;
- O número médio de viajantes deve ser maior que volume mínimo estabelecido. Prioridade deve ser dada para rotas com grande demanda.

Observa-se que a construção de rotas em algumas propostas da literatura começa inicialmente identificando o menor caminho entre a origem e destino. A partir disso, são avaliadas muitas combinações de rotas para projetar um sistema que otimize a quantidade de viajantes transportados [Yang et al., 2007].

A.2 Determinação da tabela de horário

A Figura 37 ressalta a necessidade de definir as tabelas de horários. Elas indicam os horários que os veículos alcançam e saem dos pontos de ônibus. Segundo [Michaelis and Schöbel, 2009], essa tabela é definida a partir de duas funções. A primeira função é a $\pi^{arr} : V \times F \rightarrow \mathbb{N}$. Ela atribui o tempo de chegada de cada veículo em cada parada do transporte. Já a segunda é a $\pi^{dep} : V \times F \rightarrow \mathbb{N}$, que atribui o tempo de saída de cada veículo em cada parada do coletivo. O conjunto V representa as paradas dos transportes e o conjunto F são os veículos existentes no sistema de transporte.

A.3 Planejamento das rotas dos veículos e escalonamento da tripulação

A penúltima atividade a ser apresentada é responsável por estabelecer as rotas dos veículos, que é definida a partir das linhas e das tabelas de horários. As jornadas dos veículos são os caminhos operados pelo mesmo veículo. Para cada viagem de um veículo, são informados o ponto inicial com a sua hora de partida e sua última parada com a sua hora de chegada. Algumas restrições devem ser mantidas como, por exemplo, duas viagens $trip1$ e $trip2$ podem ser servida pelo mesmo ônibus se o tempo de chegada/saída da parada final da $trip1$ mais o tempo necessário para alcançar o ponto de início da viagem $trip2$ seja menor do que a hora de partida da viagem $trip2$.

A determinação das rotas dos veículos objetiva encontrar uma atribuição de custo mínimo entre os ônibus e as viagens de tal forma que cada viagem seja coberta por

exatamente um ônibus e que os horários de todos os veículos sejam compatíveis. O resultado desse processo é o conjunto de rotas realizadas pelos veículos de transportes, além da tabela de horário para cada um dos veículos. Observa-se que uma rota do veículo descreve o caminho de um único ônibus. Entretanto ela poderia facilmente servir a várias linhas [Michaelis and Schöbel, 2009].

Para finalizar, a última atividade é a escalonar a tripulação. Ela objetiva determinar os funcionários que irão trabalhar em determinado momento [Ball et al., 2007]. É necessário maximizar a utilização deles respeitando leis trabalhistas, entre outras restrições. Ela é uma fase bastante volátil. Por isso ela é enquadrada no planejamento operacional.

APÊNDICE B – CLASSES DE PROBLEMAS DO TRANSPORTE PÚBLICO

Esse apêndice apresenta como os problemas do transporte urbano são tratados na literatura científica, os quais são agrupados através da classe de problema *Urban Transportation Network Design Problems (UTNDP)* [Farahani et al., 2013]. Tal classe apresenta os componentes relacionados ao transporte/mobilidade dentro de uma cidade. Além disso, ela está preocupada em identificar como esses problemas se apresentam ao mundo e como é possível solucioná-los. As soluções existentes podem ser a partir da indicação de métodos, técnicas, algoritmos, etc.

O UTNDP é diferente de outros problemas de projeto de rede porque a reação do usuário no projeto do sistema de transporte deve ser considerada. Logo, o projeto da rede tem que prever o comportamento do usuário para formular uma solução de otimização. Além disso, o UTNDP é subdividido em *Road Network Design Problem (RNDP)* e *Public Transit Network Design Scheduling Problem (PTNDSP)* [Farahani et al., 2013]. Eles são subproblemas que preocupam-se com aspectos diferentes do transporte urbano.

A responsabilidade do RNDP é lidar com otimizações do cenário urbano independente de modo de transporte. Ele indica melhorias na estrutura arquitetural da cidade. Essas melhorias incluem a adição de novas ruas, mudanças de fluxo das ruas existentes, etc. Os problemas RNDP ainda podem ser divididos nos seguintes subproblemas:

- *Discrete Network Design Problem (DNDP)*: Essa classe de problema lida com decisões de projeto discretos. Essas decisões podem incluir a construção de novas ruas, adição de novas pistas, determinação da direção de uma pista de mão única, entre outras escolhas;
- *Continuous Network Design Problem (CNDP)*: Esse tipo trabalha com decisões contínuas de projeto, que incluem a expansão da capacidade das ruas, programação dos sinais de trânsito, determinação do pedágio de ruas, etc;
- *Mixed Network Design Problem (MNDP)*: Essa última classe de problemas do RNDP é uma combinação de decisões discretas e contínuas.

Os problemas tratados no RNDP lidam com fatores que são difíceis de trabalhar como, por exemplo, a construção de ruas, mudança de fluxo dos veículos, etc. Já o PTNDSP trabalha com questões de otimizações relativas ao transporte público no âmbito urbano. Ele considera a topologia da rede de transporte público, bem como a frequência de operação dos serviços e as tabelas de horários dos percursos.

O PTNDSP é uma classe de problemas que visa a otimização de uma série de objetivos que representam a eficiência das redes de transporte público sob restrições operacionais e de recursos tais como o número e a duração das rotas de transporte público, as frequências

do serviço admissíveis, demanda de passageiros, e número de ônibus disponíveis. Essa classe de problema busca projetar soluções para melhor atender tanto as necessidades dos usuários com as dos operadores de transporte público [Michaelis and Schöbel, 2009]. Por exemplo, em um modelo orientado ao cliente, um orçamento é dado de forma que possam ser projetadas soluções que atendam as necessidades dos passageiros. Já em um modelo orientado ao operador, uma linha tem que cobrir uma dada demanda com um orçamento pequeno. O objetivo desse modelo é promover o lucro das empresas. Por fim, a classe de problema PTNDSP também pode ser divididos em subproblemas, os quais são listados abaixo:

- ***Transit Network Design Problem (TNDP)***: Preocupa-se exclusivamente com o projeto de rotas de linhas de trânsito, incluindo a origem e o destino da rota e a sequência de arestas visitadas;
- ***Transit Network Design and Frequency Setting Problem (TNDFSP)***: Foca em determinar a frequência de operação dos serviços de cada linha de ônibus além de projetar as rotas;
- ***Transit Network Frequency Setting Problem (TNFSP)***: Lida apenas com a configuração da frequência a partir de um estrutura de rota disponibilizada;
- ***Transit Network Timetabling Problem (TNTP)***: Objetiva determinar a tabela de horário a partir da rota e frequência do serviço;
- ***Transit Network Scheduling Problem (TNSP)***: Busca estabelecer a frequência e a tabela de horário a partir de uma estrutura de rota disponibilizada;

Observa-se que soluções para os problemas do PTNDSP (especialmente aqueles que trabalham com questões topológicas) na maioria das vezes lidam com novas configurações ou uma completa reconfiguração das redes de trânsito existentes [Farahani et al., 2013]. Por fim, a Figura 38 sintetiza graficamente um resumo dessas divisões apresentadas.

O UTNDP ainda pode ser abordado por mais uma subclasse de problema intitulada de ***Multi-Modal Network Design Problem (MMNDP)***, e que não foi apresentada na Figura 38. Essa classe considera pelo menos dois diferentes modos de transporte, os quais podem ser realizados através de automóveis privados, táxis, vans, ônibus, bicicletas, motocicletas, metrô, etc. Um tipo especial do MMNDP é o ***Bi-Modal Network Design Problem (BMNDP)*** que considera apenas dois modos de transporte.

Para finalizar, será apresentada outra divisão de como esses problemas são tratados. Geralmente, os problemas da classe UTNDP são considerados bi-nível ou líder-seguidor [Farahani et al., 2013]. Ou seja, eles são divididos em problemas de alto nível e problemas de baixo nível. O problema de alto nível é o problema do líder. Ele consiste no problema do projeto, ou o problema do tomador de decisão, que planeja ou gerencia a rede de transporte. Esse problema de nível superior está relacionado a discussões políticas e inclui objetivos mensuráveis (redução do tempo total da viagem), restrições (políticas,

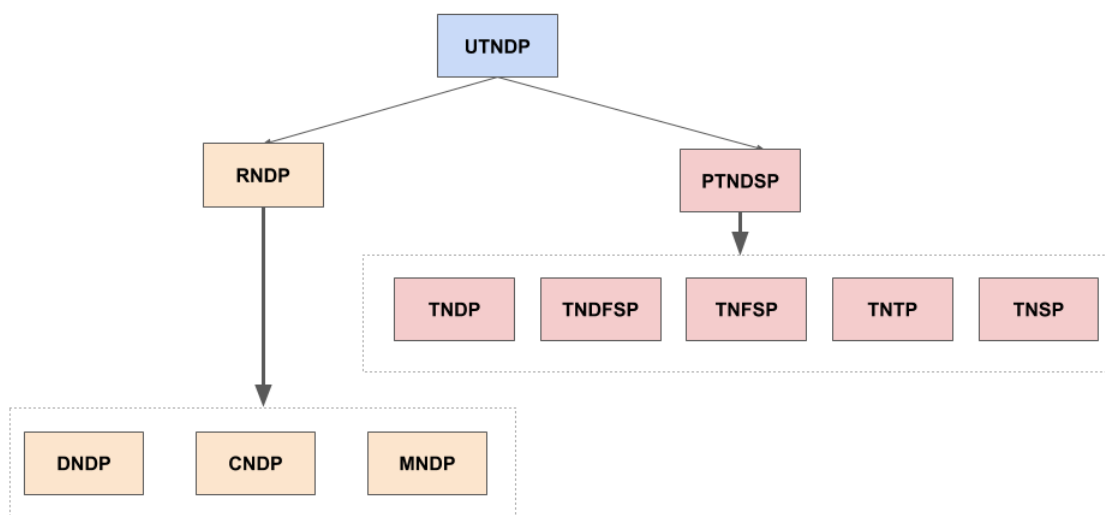


Figura 38 – Classes de problemas UTNDP

Fonte: Elaborado pelo autor

físicas e restrições ambientais) e decisões de projeto a serem feitas (novas estradas a serem construídas). Já o problema de baixo nível é o problema do seguidor ou o problema dos viajantes que decidem se viajam, caso decidam por viajar, determinar seu modo de viagem e rotas.

Essa estrutura bi-nível permite ao tomador de decisão considerar a reação dos viajantes e melhorar a rede para influenciar as escolhas das viagens dos indivíduos, entretanto não controla diretamente essas escolhas. A estrutura não permite aos viajantes estimarem a decisão do líder, mas somente os permite determinar suas escolhas depois de saber a decisão do líder. Entretanto, nas soluções propostas para o TNDSP consideram apenas o problema de um nível [Farahani et al., 2013]. Nesses casos a reação do usuário é simplificada.

APÊNDICE C – OTIMIZAÇÃO INCREMENTAL DE PERCURSO DE TRANSPORTE PÚBLICO UTILIZANDO ALGORITMO DE COLÔNIA DE FORMIGAS

O algoritmo de otimização incremental descrito na Seção 3 é uma abordagem gulosa, o que pode ser ineficiente de uma perspectiva de tempo de processamento. Dessa forma, esse anexo tem como objetivo apresentar um esboço de uma versão alternativa dessa abordagem, que é fundamentada no algoritmo de colônia de formigas. A construção dessa versão foi baseada no trabalho de Yang et al. [2007]. Além disso, ressalta-se que esse novo algoritmo também considera todas variáveis e restrições adotadas pelo método guloso, as principais são a taxa mínima de semelhança R_{min} e taxa máxima de crescimento do percurso I_{max} .

Por fim, esse anexo ficou estruturado do seguinte modo. A Seção C.1 discorre sobre os principais conceitos relacionados ao algoritmo de colônia de formigas. Já a Seção C.2 apresenta o algoritmo de construção dos percursos.

C.1 Fundamentos do algoritmo de colônia de formigas

A tese de doutorado de Dorigo [1992] introduziu um novo algoritmo de busca que se fundamenta no comportamento das formigas na busca por comida. Tal técnica tem uma natureza estocástica, já que usa análise probabilística para decidir qual caminho seguir. Sendo assim, é possível reduzir do tempo de processamento da construção dos percursos.

A geração do percurso ótimo considera os possíveis melhores caminhos para alcançar o objetivo (a fonte de comida) através de informações locais e globais. O feromônio despejado no caminho é utilizado como mecanismo de comunicação global sobre os percursos entre as formigas. Entretanto, mais recentemente, o trabalho de Yang et al. [2007] sugeriu uma nova função para atualizar esse feromônio, que é denominada de *Ant-Weight*. Essa função foi utilizada no algoritmo esboçado no Anexo C.2.

A Figura 39 ilustra o processo da busca de comida por uma colônia de formigas. No passo 1 uma formiga procura a comida por um caminho aleatório. Já no passo 2, várias formigas também começam a procurar o caminho até a fonte de comida. Ao obter a comida, elas retornam ao ninho, porém no retorno elas despejam feromônio nos caminhos mais atrativo (que nessa situação, é o menor caminho). Por fim, no passo 3, as formigas começam a seguir o menor caminho.

C.2 Algoritmo incremental utilizando colônia de formigas

Essa versão do algoritmo incremental utiliza toda estrutura apresentada na Seção 3. Isso inclui variáveis, função objetivo, restrições e alguns trechos do algoritmo descrito. O Algoritmo 1 e 2 não precisam ser alterados. Enquanto o Algoritmo 3 precisa ser modificado

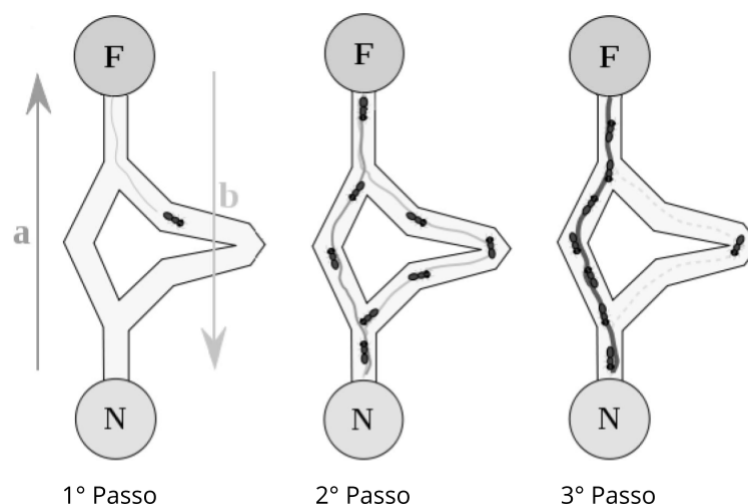


Figura 39 – Comportamento das formigas na busca por comida

Fonte: Adaptado de Martynova et al. [2015]

para suporta essa nova abordagem, apesar de cumprir o mesmo papel. Como esse, o novo algoritmo também é responsável por construir um percurso válido baseando-se em um já existente. A diferença entre eles é a estratégia de busca. O primeiro é um método guloso e esse é um método estocástico, que possui um tempo de processamento menor.

O algoritmo de colônia de formigas é uma meta-heurística, e a implementação escolhida é uma que possui uma forma de atualização do feromônio que considera informações locais e globais. Sendo cada aresta da rota responsável pelas informações locais e a densidade de viajantes diretos da rota por fornecer informações globais. O modo como é realizada essa atualização é explicado no 3º **passo** do algoritmo.

Na medida que o percurso é construído, deve ser verificado se ele não está violando a taxa mínima de semelhança R_{min} . Caso essa restrição não seja atendida, o caminho é marcado como inválido. O princípio é o mesmo aplicado pelo Algoritmo 3. Por fim, cada passo do algoritmo de construção de rotas é apresentado a abaixo:

1º passo:

Esse passo é responsável por determinar o valor inicial do feromônio de cada aresta da rede. Tal valor é definido como a densidade de viajantes diretos de todo sistema de transporte. Por fim, o feromônio inicial é determinado através da seguinte fórmula:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_{i,j \in N} SP_{ij}}{\sum_{i,j \in N} l_{ij}} \quad (C.1)$$

Onde, o primeiro operando é o somatório de todas as demandas SP_{ij} da matriz de origem-destino SP . Já o segundo é o somatório de todas distâncias l_{ij} das arestas da rede de transporte G .

2° passo:

Esse passo cria uma colônia de formigas, sendo ela responsável por encontrar um caminho entre uma estação de ônibus de origem (ninho das formigas) e a estação de destino (terminal, fonte de comida).

3° passo:

Essa etapa é responsável por procurar os caminhos entre o ninho das formigas e a fonte de comida. No início da execução, o vértice corrente s é definido como a estação de origem. Em seguida, o processo de escolha é iniciado. A escolha do próximo nó é realizada através da função de transição definida abaixo:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \times \eta_{ij}^\beta}{\sum_{h \notin tabu_k} \tau_{ih}^\alpha \times \eta_{ih}^\beta} & \text{se } j \in tabu_k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{C.2})$$

Onde, a variável τ_{ij} indica o valor do feromônio na aresta formada pelo vértice corrente s e o possível vértice de destino. Já η_{ij} é a visibilidade da aresta. Ela garante que a formiga terá um interesse por um nó que seja mais vantajoso localmente. Essa variável é definida como $\eta_{ij} = SP_{ij}/l_{ij}$, que é densidade de viajantes diretos da aresta. Já os parâmetros α e β são responsáveis por determinar o poder de influencia do feromônio τ_{ij} e da visibilidade η_{ij} . Caso $\alpha > \beta$, a escolha do feromônio terá maior influência na escolha do próximo vértice. Enquanto na situação $\beta > \alpha$, a visibilidade terá maior influência. Por fim, a tabela $tabu_k$ é responsável por guardar os nós que uma formiga não pode mais percorrer até ela encontrar a comida. Essa tabela permite gravar um histórico de escolhas erradas, evitando que elas voltem a se repetir.

Apesar desse processo sofisticado de escolha, é também importante acrescentar um pouco de aleatoriedade, já que as formigas podem terminar sempre escolhendo um caminho que não seja o máximo global. Essa situação pode existir em decorrência do depósito errôneo de feromônio. Por exemplo, caso várias formigas escolham o mesmo caminho e depositem uma grande quantidade de feromônio, elas, nos próximos passos, terão uma forte disposição a escolher o mesmo caminho durante a próxima busca por comida, apesar de talvez não ser um percurso ótimo.

Por fim, o resultado final dessa etapa será os caminhos gerados pelas formigas.

4° passo:

O feromônio τ é utilizado pelas formigas para se comunicarem. Dessa forma, ele deve ser atualizado após todas as formigas alcançarem o destino. Tal atualização é realizada

localmente e globalmente. Para atualizar o feromônio é utilizada a seguinte equação:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{f^k} \times \frac{f^k - f_{ij}}{(n-2)f^k} & \text{se a aresta } (i, j) \text{ é da rota } k_{th} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{C.3})$$

Onde, $\Delta\tau_{ij}$ é o incremento da formiga k para o feromônio da aresta (i, j) . Já f_{ij} e f_k são, respectivamente, a densidade de viajantes diretos da aresta (i, j) e da rota da formiga k . A variável n é o número de nós da rota e Q é uma constante.

Na definição do incremento do feromônio, a divisão $\frac{Q}{f_k}$ é a contribuição global. Enquanto a contribuição local é realizada pela $\frac{f_k - f_{ij}}{(n-2)f_k}$, que indica a influência de uma aresta isolada para o feromônio.

A partir da definição do incremento do feromônio, é necessário estabelecer um mecanismo para ajustar o valor do feromônio, que deve respeitar valores mínimos e máximos. O intervalo de valores aceito é descrito por $[\tau_{min}, \tau_{max}]$. Por fim, eles devem ser atualizados da seguinte forma:

$$\tau_{ij}^{new} = \rho \times \tau_{ij}^{old} + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad \rho \in (0, 1) \quad (\text{C.4})$$

$$\tau_{min} = \min(f_{ij}), \tau_{max} = \max(f_{ij}) \quad (\text{C.5})$$

$$\tau_{ij} = \begin{cases} \max(\tau_{min}, \tau_{ij}^{new}) & \tau_{ij}^{new} < \bar{\tau} \\ \min(\tau_{max}, \tau_{ij}^{new}) & \tau_{ij}^{new} \geq \bar{\tau} \end{cases} \quad (\text{C.6})$$

Onde, τ_{ij}^{new} é valor do feromônio após a atualização e τ_{ij}^{old} é o valor do feromônio antes da atualização. Já ρ é a constante que controla a evaporação do feromônio e ela possui valor entre 0 e 1.

5° passo:

A tarefa dessa etapa é verificar as restrições operacionais. As duas principais são a taxa mínima de similaridade R_{min} e taxa máxima de crescimento I_{max} . Caso elas não sejam respeitadas, o percurso é descartado e adicionado na tabela $tabu_k$, que contém os percursos inválidos da formiga k . Dessa forma, o processo de escolha da rota é reiniciado. Observa-se que essas restrições também podem ser verificadas no **3° passo**, durante a escolha do próximo nó. Realizando a validação nesse momento, é possível ignorar nós antes do percurso ser construído, o que reduz o tempo de processamento.

Por fim, se não houver violações das restrições, a rota construída S_{OD}^x é adicionada ao conjunto S_{OD} e algoritmo retorna para o **2° passo** com novos nós de origem e

destino para gerar uma nova rota. Esse processo se repetirá enquanto houver pontos de ônibus de origem e destinos.