



Luiz Eduardo Cotta Monteiro

**Modelos de simulação e de programação matemática
aplicados na análise e otimização do transporte de
passageiros na Linha 4 do sistema metroviário do
Rio de Janeiro**

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1621707/CA

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Hugo Miguel Varela Repolho

Rio de Janeiro
Abril de 2018



Luiz Eduardo Cotta Monteiro

Modelos de simulação e de programação matemática aplicados na análise e otimização do transporte de passageiros na Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Hugo Miguel Varela Repolho

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Paulo Cesar Ribas

Departamento de Engenharia de Produção – UVA

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de abril de 2018.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Luiz Eduardo Cotta Monteiro

Graduou-se em Comunicação Social com Habilitação em Radialismo pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 2004. Atua como produtor executivo da Empresa Municipal de Multimeios desde 2005. Graduou-se em Engenharia de Produção na Universidade Veiga de Almeida em 2015. Aluno de mestrado da PUC-Rio desde agosto de 2016.

Ficha Catalográfica

Monteiro, Luiz Eduardo Cotta

Modelos de simulação e de programação matemática aplicados na análise e otimização do transporte de passageiros na Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro / Luiz Eduardo Cotta Monteiro ; orientador: Hugo Repolho. – 2018.

80 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Simulação. 3. Otimização. 4. Transporte de passageiros. 5. Sistema metroviário. 6. Modelagem matemática. I. Repolho, Hugo Miguel Varela. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

Agradeço a Deus por ter me dado luz, saúde e forças para superar os inúmeros desafios nessa jornada.

À minha família, minha profunda gratidão por todo apoio e carinho. Faço um destaque especial para a minha esposa, Virginia Capibaribe, que sempre esteve ao meu lado. A sua presença foi essencial para o meu desenvolvimento.

Ao meu orientador Hugo Repolho, meu agradecimento por seus valiosos direcionamentos, solicitude e pelo zelo demonstrado com o meu trabalho.

Aos professores José Eugenio Leal e Paulo Cesar Ribas, meus agradecimentos por aceitarem o convite em ler e avaliar o meu trabalho e por seus valiosos ensinamentos.

Aos novos amigos que fiz durante o curso de pós-graduação agradeço pelo incentivo, apoio, troca de experiências e cumplicidade.

À empresa MetrôRio por ter me recebido em visitas técnicas e por ter fornecido dados importantes para a conclusão da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), fundação do Ministério da Educação (MEC), pelo apoio por meio de bolsa de estudos que me permitiu cursar o mestrado acadêmico.

Meus sinceros votos de agradecimentos a todos os professores e profissionais do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-RIO que me proporcionaram um valioso aprendizado no desenvolvimento humano e profissional.

Resumo

Monteiro, Luiz Eduardo Cotta; Repolho, Hugo Miguel Varela (Orientador); **Modelos de simulação e de programação matemática aplicados na análise e otimização do transporte de passageiros na Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro, 2018. 80p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sistemas metroviários desempenham um importante papel no transporte de passageiros nos grandes centros urbanos por sua alta capacidade de transporte, seu baixo índice poluente e por serem relativamente livres de congestionamentos. O *headway* - intervalo entre os trens – é uma importante variável no planejamento do serviço pois influencia na capacidade oferecida e no custo de operação. Este trabalho desenvolve um modelo de simulação de eventos discretos aplicado na análise da estrutura, capacidade e funcionamento da Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro, sendo realizados experimentos com diferentes tempos de *headway* de forma a medir e avaliar o desempenho do sistema no atendimento à demanda prevista. Desenvolve-se um modelo de programação linear inteira mista (MIP) com o objetivo de encontrar valores ótimos de *headway* para a sua operação. Os modelos consideram as restrições de capacidade dos trens, tempos de deslocamento e a demanda dinâmica dos passageiros em cada estação. São utilizados dados do Estudo de Demanda para a Linha 4 (FGV, 2011) com a previsão de demanda para o período de pico da manhã do ano de 2016. O trabalho permite concluir que o dimensionamento da capacidade da Linha 4 do metrô atende com eficiência a demanda projetada para o ano de 2016 e que os modelos de simulação e otimização desenvolvidos podem ser adaptados e utilizados no apoio ao planejamento e operação de outros sistemas metroviários.

Palavras-chave

Simulação; otimização; transporte de passageiros; sistema metroviário; modelagem matemática; demanda dinâmica.

Abstract

Monteiro, Luiz Eduardo Cotta; Repolho, Hugo Miguel Varela (Advisor); **Simulation and mathematical programming models applied in the analysis and optimization of passenger transport in Line 4 of the Rio de Janeiro subway system.** Rio de Janeiro, 2018. 80p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Subway systems play an important role in passenger transportation in large urban centers due to their high transport capacity, low pollutant content and for being relatively free of traffic congestion. The headway - intervals between trains – is an important variable in service planning because it influences the capacity offered and cost of operation. This work develops a discrete event simulation model applied in the analysis of the structure, capacity and operation of Line 4 of the Rio de Janeiro subway system. Experiments with different headway times are performed in order to measure and evaluate the system performance in meeting the forecasted demand. A mixed integer linear programming model (MIP) is developed in order to find optimal headway values for its operation. The models consider the train capacity constraints, travel times constraints and the dynamic passenger demand at each station. Data from the Demand Study for Line 4 (FGV, 2011) are used with the demand forecast for the morning peak period of 2016. The work allows to conclude that the dimensioning of the capacity of the subway Line 4 efficiently meets the projected demand for the year 2016 and that the simulation and optimization models developed can be adapted and used to support the planning and operation of other metro systems.

Keywords

Simulation; optimization; passengers transportation; subway system; mathematical modelling; dynamic demand.

Sumário

1. Introdução	11
1.1. Motivação	12
1.2. Objetivos gerais e específicos	13
1.3. Organização do trabalho	14
2. Metodologia e classificação da pesquisa	15
3. Revisão da literatura	17
3.1. Pesquisa e seleção de estudos	17
3.2. Identificação dos estudos	18
3.3. Análise dos estudos relacionados a modelos de simulação	21
3.4. Análise dos estudos relacionados a modelos de otimização	25
3.5. Análise dos estudos relacionados a modelos de simulação e otimização	28
3.6. Contribuições da pesquisa	32
4. Modelo de simulação de eventos discretos	35
4.1. Metodologia de modelagem e simulação	35
4.2. Análise e coleta de dados	37
4.3. Concepção e implementação do modelo de simulação	45
4.4. Experimentos e análise dos resultados do modelo de simulação	51
5. Modelo de programação matemática	57
5.1. Metodologia de modelagem e programação matemática	57
5.2. Modelo de programação inteira mista	58
5.3. Análise e tratamento dos dados para o modelo de otimização	63
5.4. Implementação e validação do modelo	66
5.5. Resultados do modelo de programação matemática	66
5.6. Modelo de programação matemática com <i>headway</i> variável	70
6. Conclusões e considerações finais	74
7. Referências bibliográficas	77

Lista de figuras

Figura 1 - Total de publicações por ano	20
Figura 2 - Total de publicações por linha metroviária (cidade, país)	21
Figura 3 - Metodologia de modelagem e simulação de eventos discretos	36
Figura 4 - Somatório dos motivos de transporte coletivo na Região Metropolitana do Rio de Janeiro com destino à AP1 no pico da manhã.....	38
Figura 5 - Tempos médios da linha 4 do Metrô	38
Figura 6 - Distribuição de viagens por tipo de transporte	42
Figura 7- Variação do fluxo de passageiros nas Linhas 1 e 2 do Metrô.....	42
Figura 8 - Distribuição da demanda em cada estação no período de pico da manhã.	43
Figura 9 - Modelo conceitual da linha 4 do metrô.	45
Figura 10 - Modelo computacional de simulação da linha 4 do Metrô.....	48
Figura 11 - Funcionamento da primeira estação da linha no modelo computacional.....	49
Figura 12 - Funcionamento da estação intermediária no modelo computacional .	50
Figura 13 - Gráfico da distribuição de chegadas discretizada em subperíodos de 30 segundos e distribuída uniformemente a cada intervalo de 10 minutos.	65
Figura 14 - Resultado no AIMMS para o modelo considerando a capacidade de 1200 pessoas por trem.	67
Figura 15 - Resultado no AIMMS para o modelo considerando a capacidade de 1800 pessoas por trem.	67

Lista de tabelas

Tabela 1 - Lógicas de busca e resultados preliminares	18
Tabela 2 - Tempos médios da Linha 4	39
Tabela 3 - Dados operacionais da Linha em outubro de 2016	40
Tabela 4 - Demanda prevista para o período de pico da manhã (6:30 às 9:29).....	41
Tabela 5- Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 8 minutos.....	53
Tabela 6 - Resultados da taxa de ocupação média e máxima com variação de <i>headway</i> entre 7 e 3 minutos e capacidade de 1800 pessoas por trem.	53
Tabela 7 - Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 6 minutos e capacidade do trem de 1800 pessoas.	54
Tabela 8 - Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 6 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.	55
Tabela 9 - Resultados da taxa de ocupação média e máxima e variação do <i>headway</i> com capacidade de 1200 pessoas por trem.....	55
Tabela 10 - Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 3,5 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.	56
Tabela 11 - Conjuntos, índices e seus domínios correspondentes.....	59
Tabela 12 - Parâmetros do modelo	59
Tabela 13 - Descrição das variáveis do modelo	60
Tabela 14 - Tempos de deslocamento adaptados ao parâmetro Tite	64
Tabela 15 - Valores médios de chegada em cada intervalo.....	65
Tabela 16 - Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 3 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.....	68
Tabela 17 - Resultados do modelo de simulação com <i>headway</i> de 5,5 minutos e capacidade de 1800 pessoas por trem.	68
Tabela 18 - Quantidade de viagens de trem no período de 180 minutos de acordo com o tempo de <i>headway</i>	69
Tabela 19 - Tamanho da frota de acordo com o tempo de <i>headway</i>	70
Tabela 20 - Tempos de <i>headway</i> para cada viagem de trem (k) no cenário com capacidade de 1800 pessoas por trem.....	72
Tabela 21 - Tempos de <i>headway</i> para cada viagem de trem (k) no cenário com capacidade de 1200 pessoas por trem.....	72
Tabela 22 - Resultado da quantidade de viagens de trem (k) e tempo de processamento para solução dos modelos de otimização com <i>headway</i> fixo e variável.	72

Lista de quadros

Quadro 1 - Identificação dos estudos	18
Quadro 2 – Características dos modelos de simulação.....	24
Quadro 3 – Características dos modelos de otimização	27
Quadro 4 – Características dos modelos de simulação e otimização	31
Quadro 5 – Distribuição percentual das chegadas de passageiros na Linha 4 no período de pico da manhã em novembro de 2017.....	44
Quadro 6 – Volume de demanda em cada estação distribuído por cada intervalo de 10 minutos no período de pico da manhã.....	44
Quadro 7 – Parâmetros de tempo médio entre chegadas em segundos utilizado na distribuição exponencial para modelar as chegadas de passageiros.....	44
Quadro 8 – Resumo dos principais blocos de modelagem, sua aplicação e parâmetros utilizados no modelo.....	51

1 Introdução

O rápido processo de urbanização e crescimento dos centros urbanos tem provocado sérios problemas de mobilidade nas grandes cidades. Carvalho (2016) destaca que na realidade brasileira a falta de investimentos na rede de infraestrutura urbana e de transporte de massa ao longo dos anos explica em grande parte o aumento da degradação das condições de mobilidade da população, principalmente em função do crescimento dos acidentes de trânsito com vítimas, intensos congestionamentos urbanos e poluição atmosférica. Nesse contexto, o planejamento dos sistemas de transporte e a promoção da mobilidade urbana são desafios que se apresentam às cidades brasileiras, tanto em termos qualitativos na busca por melhores níveis de serviço nos diferentes modos de transporte coletivo e melhoria das condições viárias, como em termos quantitativos no aumento da capacidade de transporte de massa.

A importância da mobilidade urbana nas cidades brasileiras motivou a criação da Lei 12.587 de 2012 que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana objetivando “a integração entre os diferentes modos de transporte e a melhoria da acessibilidade e mobilidade das pessoas e cargas no território do Município”. A lei determina que todos os municípios com mais de 20.000 habitantes devem elaborar um Plano de Mobilidade Urbana no prazo de sete anos a contar da entrada em vigor da lei, contemplando os seus princípios, objetivos e diretrizes.

Os conceitos de transporte, mobilidade e acessibilidade apresentam diversas definições na literatura. Portugal et al. (2017), após realizarem a revisão da literatura relacionada a esses conceitos, apresentam as seguintes definições: transporte compreende as infraestruturas e serviços destinados à realização das viagens e deslocamentos de pessoas e mercadorias; mobilidade está associada a movimento e aos deslocamentos desejados e realizados para desenvolver

atividades; e acessibilidade é a facilidade de alcançar atividades que dependem dos transportes, do uso do solo e da integração entre eles.

Ribeiro et al. (2001) ao analisar as alternativas para desenvolvimento de transportes mais sustentáveis – capazes de diminuir o consumo de energia, emissão de poluentes e promover a acessibilidade com equidade – destaca algumas medidas como: a racionalização dos transportes coletivos com uma maior integração intermodal e aumento da segurança e conforto como forma de incentivo à transferência de passageiros do automóvel individual para a modalidade pública; maior utilização de sistemas de transporte que usem fontes de energia menos poluentes como o sistema ferroviário e *trolebus*; e investimento no metrô proporcionando uma melhoria no serviço no que se refere à frequência de trens para captar uma parcela da população que utilize transporte particular.

Os sistemas metroviários desempenham um importante papel no transporte de passageiros por sua alta capacidade de transporte, seu baixo índice poluente e por serem relativamente livres de congestionamentos (You et al., 2016). Um importante problema nos sistemas metroviários consiste em definir o intervalo entre os trens de acordo com a demanda de passageiros. Custos operacionais e tempo de viagem dos passageiros precisam ser balanceados na otimização da escala dos trens (Sun et al., 2015).

O presente trabalho tem como objeto de estudo a Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro e utilizando dados do Estudo de Demanda para Linha 4 (FGV, 2011), dados operacionais informados pelo operador do sistema e dados coletados em pesquisa realizada em campo, desenvolve a concepção e implementação de um modelo de simulação de eventos discretos e um modelo de programação matemática aplicados na análise do desempenho do seu sistema, na avaliação de sua capacidade no transporte de passageiros e na obtenção de valores ótimos de *headway* para a sua operação de acordo com o comportamento da demanda.

1.1. Motivação

Este trabalho teve o seu início no segundo semestre do ano de 2016, momento em que a Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro iniciava as suas operações de transporte regular de passageiros. Nesse momento foram

divulgados dados operacionais da Linha 4 como o tamanho da frota, a capacidade dos trens, os tempos médios de deslocamento e de parada e o tempo de *headway*. Comparando os dados operacionais divulgados com a previsão de demanda disponibilizada no Estudo de Demanda (FGV, 2011) a pergunta inicial de pesquisa foi no sentido de avaliar a capacidade estrutural e operacional da Linha 4 em atender a demanda de passageiros prevista para aquele ano. Da pergunta inicial surgiram outros questionamentos: o tamanho da frota de trens da Linha 4 atende com eficiência a demanda prevista? Como medir o desempenho de uma linha metroviária em atender uma dada demanda de passageiros que varia ao longo do tempo? Que indicadores de desempenho e medidas estatísticas devem ser utilizados?

Nesse contexto, foi percebida a oportunidade de aplicar os conhecimentos de pesquisa operacional e mais especificamente de programação matemática e modelagem e simulação de eventos discretos para analisar o problema e responder às questões levantadas.

1.2. Objetivos gerais e específicos

Esta dissertação tem como objetivo geral o desenvolvimento de modelos de apoio à decisão no planejamento de sistemas de transporte metroviário por meio da concepção e implementação de um modelo de simulação de eventos discretos e de um modelo de programação matemática.

Para a concepção, validação e implementação dos modelos será utilizada como referência o sistema metroviário da Linha 4 do Rio de Janeiro e como objetivos específicos desse trabalho espera-se:

(i) fazer uma revisão sistemática da literatura sobre os estudos envolvendo modelos de simulação e de otimização aplicados em sistemas metroviários;

(ii) aplicar o modelo de simulação ao sistema metroviário da Linha 4 do Rio de Janeiro realizando a análise dos resultados e a avaliação da capacidade do sistema em atender a demanda de passageiros prevista para o ano de 2016;

(iii) aplicar o modelo de programação matemática ao sistema metroviário da Linha 4 do Rio de Janeiro para a obtenção de valores ótimos de *headway* utilizando dados oficiais de previsão de demanda de passageiros o ano de 2016.

Espera-se que os modelos desenvolvidos possam ser utilizados como referências para novas aplicações em outros sistemas metroviários.

1.3. Organização do trabalho

Este trabalho está organizado em sete capítulos. Após a introdução, o segundo capítulo expõe a metodologia e classificação da pesquisa. O capítulo 3 apresenta a revisão da literatura relacionada a modelos de simulação e de otimização aplicados em sistemas metroviários. O capítulo 4 trata da modelagem e simulação de eventos discretos apresentando a metodologia adotada, a validação e implementação do modelo, os experimentos e a análise dos resultados de simulação. O capítulo 5 apresenta a modelagem de programação matemática e sua aplicação para a obtenção de valores ótimos de *headway* de acordo com a demanda. O capítulo 6 apresenta as conclusões e considerações finais e o capítulo 7 as referências bibliográficas.

2

Metodologia e classificação da pesquisa

Vergara (2005) propõe dois critérios básicos para classificação de pesquisas científicas: quanto aos fins e quanto aos meios. Com relação à finalidade esta pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa aplicada pois é motivada pela necessidade de resolver problemas concretos, objetivando uma utilidade econômica e social, e também como uma pesquisa exploratória pois busca expandir o conhecimento de uma determinada área, neste caso no desenvolvimento de modelos de simulação e de programação matemática aplicados no transporte de passageiros em sistemas metroviários. Com relação aos meios de investigação trata-se de uma pesquisa ao mesmo tempo bibliográfica e experimental. Bibliográfica pois realiza um estudo sistematizado com base em material publicado, e experimental pois envolve experimentos computacionais, construção de modelos e a manipulação de variáveis com a investigação de suas relações e efeitos em um sistema.

Oliveira (1999) destaca dois principais métodos relacionados à abordagem da pesquisa científica: métodos qualitativos e quantitativos. Esta pesquisa utiliza uma abordagem majoritariamente quantitativa tendo em vista a quantificação dos dados e das variáveis do problema e a sua representação em modelos matemáticos, embora também envolva uma abordagem qualitativa ao analisar o problema do transporte de passageiros no contexto urbano e identificar e qualificar as principais variáveis do problema.

Os métodos envolvendo modelagem e simulação de eventos discretos e modelagem e programação matemática são métodos reconhecidos por sua capacidade em desenvolver e encontrar soluções objetivas para problemas aplicados e são desenvolvidos especialmente na área de Pesquisa Operacional (PO). A Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO) define PO como a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos

avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana (SOBRAPO, 2017).

Em linhas gerais, para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa foram realizadas as seguintes etapas: (i) formulação da pesquisa e delineamento do problema; (ii) revisão da literatura; (iii) coleta, análise e tratamento de dados; (iv) concepção, implementação e validação do modelo de simulação; (v) experimentos com o modelo de simulação e análise de resultados (vi) concepção, implementação e validação do modelo de programação linear inteira mista (MIP); (vii) experimentos com o modelo MIP e análise dos resultados; (viii) conclusões e considerações finais. As etapas estão detalhadas ao longo do trabalho.

3 Revisão da literatura

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura relacionada a modelos de simulação e otimização aplicados em sistemas metroviários com o objetivo de identificar e analisar os principais estudos e abordagens já realizados por outros autores e apontar as contribuições e os diferenciais deste trabalho. A revisão compreende a pesquisa, seleção e identificação de estudos relevantes, análise e síntese dos estudos selecionados.

3.1. Pesquisa e seleção de estudos

Na pesquisa e seleção de estudos foi adaptada a metodologia proposta por Thomé et al. (2016) com as etapas: (i) seleção das bases de dados e periódicos; (ii) identificação de palavras-chaves relevantes para a pesquisa; (iii) criação de critérios de exclusão de estudos; (iv) leitura dos resumos dos artigos encontrados na pesquisa e aplicação de critérios de exclusão; (v) revisão do texto completo dos artigos selecionados; (vi) inserção de outras referências consideradas relevantes por meio de pesquisa para trás, i. e., por “varredura” às referências citadas nos artigos selecionados; e (vii) inserção de outras referências consideradas relevantes por meio de pesquisa para frente, i. e., nos trabalhos em que são citados os artigos selecionados.

Na primeira etapa foram selecionadas duas bases de dados com reconhecida relevância nas áreas de engenharia, pesquisa operacional e transportes: Scopus e Web of Science. Na etapa seguinte foram selecionadas as palavras-chaves com o intuito de obter resultados ao mesmo tempo abrangentes - para que os artigos relevantes fossem encontrados - e bem definidos com relação ao escopo da pesquisa - para que limitasse o número total de resultados evitando um número excessivo que tornasse inviável a sua análise.

As lógicas de busca foram feitas a partir da combinação das palavras-chaves considerando: (a) modelos de simulação aplicados em sistemas

metroviários; e (b) modelos de otimização aplicados em sistemas metroviários. As lógicas de busca, o número total de artigos encontrados em cada base de dados e o total de artigos excluindo-se os artigos duplicados estão descritos na Tabela 1. A consulta às bases de dados foi realizada em outubro de 2017.

Tabela 1: Lógicas de busca e resultados preliminares

	Lógica de Busca	Total de artigos na Scopus	Total de artigos na Web of Science	Total excluindo repetições
(a)	((metro or subway) and (transport or passenger or demand) and (analys* or model*)) AND Título: (simulat*)	71	50	111
(b)	((metro or subway) and (transport or passenger or demand) and (analys* or model*)) AND Título: (optmiz*)	114	43	140

Na terceira etapa foram criados os critérios de exclusão dos artigos, quais sejam: (i) o trabalho não está relacionado ao fluxo ou demanda de passageiros no sistema; (ii) o artigo não é de uma das áreas: transportes, engenharias, ciências da computação ou pesquisa operacional; (iii) o artigo trata somente do fluxo de passageiros na plataforma; (iv) o artigo aborda o modo ferroviário e não o metroviário; (v) o artigo somente está disponível em idioma diferente do inglês, espanhol ou português.

Na quarta etapa foi realizada a leitura dos resumos e a exclusão dos artigos conforme os critérios estabelecidos na etapa anterior, resultando em um total de 13 artigos incluídos na pesquisa relativa a modelos de simulação e 16 artigos incluídos sobre modelos de otimização, sendo que 7 dos artigos incluídos constavam nas duas pesquisas de simulação e otimização, resultando em um total de 22 artigos para leitura do texto integral. Durante a leitura dos textos integrais, nas etapas (vi) e (vii) do método de pesquisa e seleção de estudos foi adicionado mais 1 artigo totalizando 23 artigos incluídos na revisão integral.

3.2. Identificação dos estudos

A identificação dos estudos selecionados está resumida no Quadro 1 com a indicação dos autores, ano da publicação, cidade e país do sistema metroviário objeto do estudo, tipos de modelos aplicados (simulação e/ou otimização), fonte da publicação e número de citações.

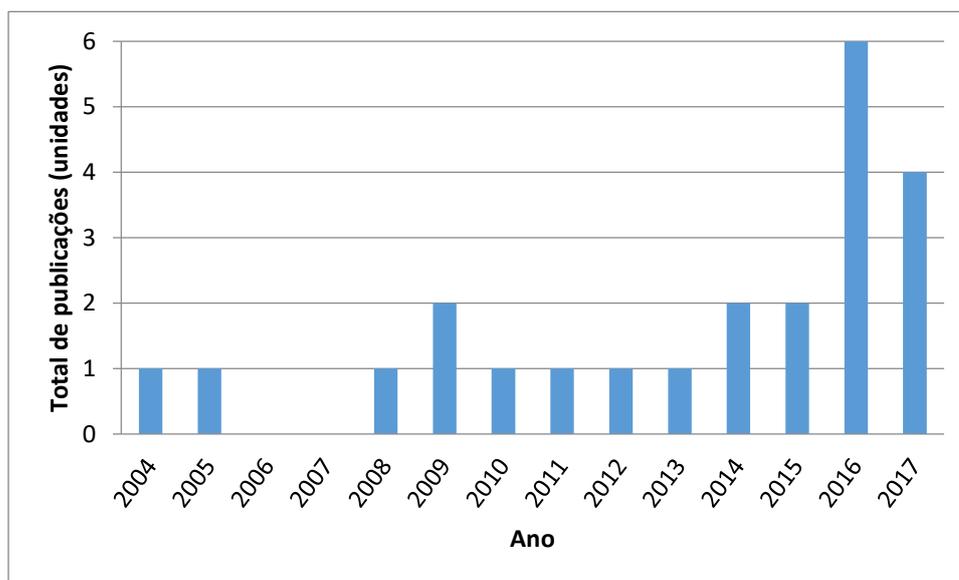
Quadro 1 - Identificação dos estudos

Artigo / Autor	Ano	Linha aplicada	Modelo aplicado	Fonte de Publicação	Número de citações
Halim H.I., Sakr M.A., Aly W.M.	2017	Cairo, Egito	Simulação e otimização	2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence	-
Schmaranzer D., Braune R., Doerner K.F.	2017	Viena, Áustria	Simulação	Proceedings - Winter Simulation Conference	-
Stoilova S., Stoev V.	2017	Sofia, Bulgária	Simulação e otimização	Promet - Traffic - Traffico	-
Yang, Xin; Chen, Anthony; Ning, Bin; Tang, Tao	2017	Beijing, China	Otimização	Transportation Research Part E- Logistics and Transportation Review	1
Ding X., Yang X., Hu H., Liu Z., Pan H.	2016	Shangai, China	Otimização	Mathematical Problems in Engineering	-
Shahi, M., Mehdipour E., Amiri, M.	2016	Teerã, Irã	Simulação e otimização	International Transactions In Operational Research	-
Shang P., Li R., Yang L.	2016	Beijing, China	Otimização	Procedia Engineering	-
Sun X., Lu H., Dong H., Xun J.	2016	Beijing, China	Otimização	IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC	-
Xu X., Li K., Li X.	2016	Beijing, China	Otimização	Journal of Advanced Transportation	9
You J., Guo W., Zhang Y., Hu J.	2016	Beijing, China	Simulação	IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC	-
Sahelgozin M., Alimohammadi A.	2015	Teerã, Irã	Simulação e otimização	International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences	-
Sun X., Zhang S., Dong H., Chen Y., Zhu H.	2015	Beijing, China	Otimização	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	3
Hassannayebi, E; Sajedinejad, A; Mardani, S	2014	Teerã, Irã	Simulação e otimização	Simulation Modelling Practice and Theory	8
Yang X., Ning B., Li X., Tang T.	2014	Beijing, China	Otimização	IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems	33
Reyes F., Cipriano A.	2012	Santiago, Chile	Simulação e Otimização	IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline)	-
Chao-Ming H., Pei-Pei C., Mao Z., Meng-Zi C., Lei L.	2013	-	Otimização	Information Technology Journal	-
Grube, P; Nunez, F; Cipriano, A	2011	Santiago, Chile	Simulação	Simulation Modelling Practice and Theory	12
Nunez, F; Reyes, F; Grube, P; Cipriano, A	2010	Santiago, Chile	Simulação	IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine	4
Dumbek F., Celebi D.	2009	Istambul, Turquia	Simulação	International Workshop on Modeling and Applied Simulation, MAS 2009, Held at the International Mediterranean and Latin American Modeling Multiconference, I3M	-
Yalçinkaya O., Mirac Bayhan G.	2009	-	Simulação e otimização	European Journal of Operational Research	43
Liebchen, Christian	2008	Berlin, Alemanha	Otimização	Transportation Science	56
Vázquez-Abad F.J., Zubieta L.	2005	-	Simulação e otimização	Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications	12
Ballis A., Liberis K., Moschovou T.	2004	Atenas, Grécia	Simulação	Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit	1

No Quadro 1 os artigos estão listados pela ordem: (i) ano mais recente da publicação; (ii) ordem alfabética. Os casos em que não há citações aos artigos e não é indicado o sistema metroviário em que o modelo é aplicado, estão indicados na tabela por hífen.

A Figura 1 apresenta o gráfico com a quantidade total de publicações por ano entre 2004 e 2017 e mostra que houve um aumento significativo de publicações nos anos recentes de 2016, com 6 publicações, e 2017 com 4 publicações. Em 2014 e 2015 foram publicados dois artigos em cada ano e entre 2004 e 2013 foi publicado uma média aproximada de 1 artigo por ano. O crescente número de publicações nos anos recentes pode ser resultado do importante papel que os sistemas metroviários têm desempenhado na mobilidade urbana das grandes cidades, especialmente em função dos problemas de congestionamento do tráfego viário nos centros urbanos e da importância do tema da sustentabilidade.

Figura 1: Total de publicações por ano

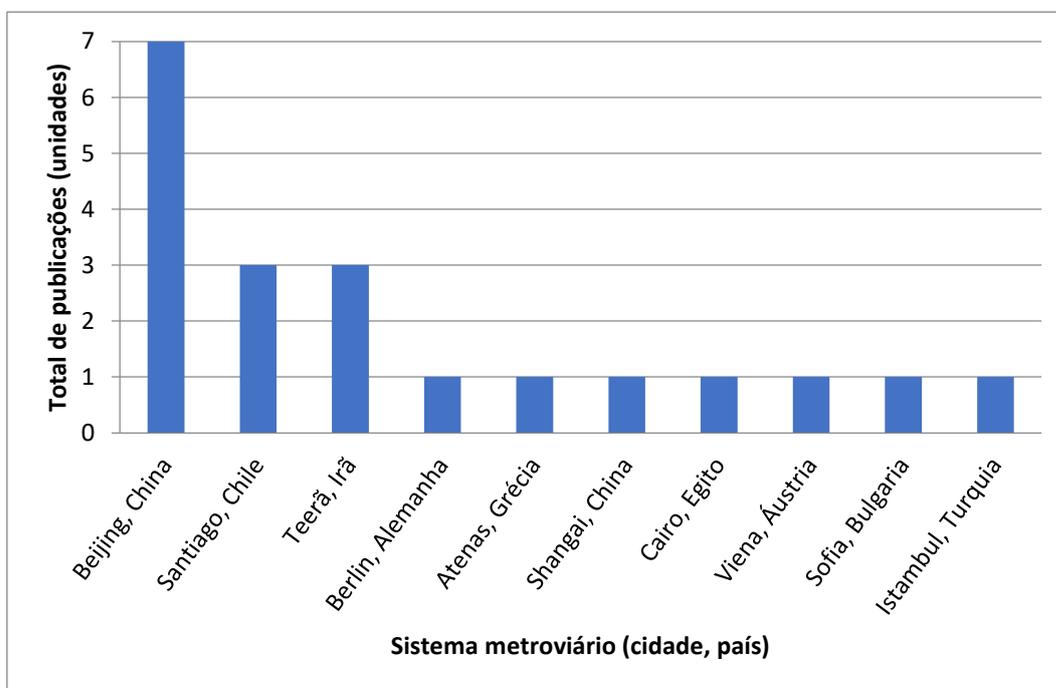


Fonte: Autor (2018).

A Figura 2 apresenta um gráfico com a quantidade de publicações para cada sistema metroviário objeto dos estudos selecionados. Nota-se que o sistema de Beijing na China teve o maior número de estudos, com um total de 7 estudos, seguido dos sistemas de Santiago e Teerã com 3 estudos cada. As outras cidades citadas foram objeto de 1 estudo cada. O maior número de publicações relacionado ao sistema de Beijing pode ser explicado pela grande importância que

o sistema metroviário desempenha na mobilidade dessa cidade e pelos enormes investimentos que a China tem feito nos últimos anos em soluções de transporte coletivo, não só no metrô mas também no trem bala.

Figura 2: Total de publicações por linha metroviária (cidade, país)



Fonte: Autor (2018).

Nos estudos selecionados é possível identificar diferentes métodos de simulação e otimização com diferentes abordagens, objetivos e uso de diferentes medidas estatísticas para a análise dos resultados. Nas próximas seções é apresentada a análise de cada estudo e no item 3.6 são apresentadas as contribuições deste trabalho com relação aos demais estudos da literatura.

3.3.

Análise dos estudos relacionados a modelos de simulação

O trabalho de You et al. (2016) tem como objetivo desenvolver o modelo de simulação de um sistema metroviário com múltiplas linhas explicitando o seu framework e validando o seu funcionamento. O modelo é baseado no sistema de Beijing, China, e é construído em três estágios considerando a infraestrutura; os passageiros e a operação do sistema. É utilizada uma matriz origem-destino e um algoritmo de menor caminho para simular a escolha de rotas pelos passageiros. O

modelo é verificado por meio da comparação dos dados reais do número de saída de passageiros por estação com os resultados da simulação. No estudo é realizado somente um experimento em que é aplicado o atraso em uma hora na demanda de passageiros com destino à estação central e é analisado o seu efeito no fluxo de passageiros. As conclusões baseadas nos resultados são relativamente triviais com o deslocamento em uma hora da curva de saída de passageiros na estação central. Não são apresentados resultados para as métricas do tempo de espera dos passageiros e de capacidade do sistema.

Schmaranzer et al. (2016) apresentam um modelo de simulação implementado no software AnyLogic e tem como objetivo principal fazer uma análise da performance e capacidade do sistema metroviário de Viena, Áustria, avaliando o seu comportamento em dois cenários diferentes: um com variações de *headway* e outro *headway* fixo e o aumento no número de passageiros. O estudo busca encontrar os limites de desempenho com os recursos operacionais atuais do sistema. As métricas de performances são apresentadas em valores médios e máximos do sistema como um todo, impossibilitando a análise de desempenho de cada trem ou estação separadamente. Os resultados não indicam uma configuração de melhoria na sua operação.

Grube et al. (2011) apresentam um modelo de simulação desenvolvido em C# e no software MATLAB e aplicado no metrô de Santiago, Chile. O modelo oferece ao usuário a opção de configurar alguns parâmetros (número de trens, *headway*, tempo de deslocamento, taxa de chegada de passageiros por estação e por tempo), e as possibilidades de medidas estatísticas do sistema incluem o tempo médio total de viagem e de espera dos passageiros, taxa média e máxima de ocupação das estações e dos trens no sistema. Uma limitação do modelo é que as estatísticas são dadas em termos globais do sistema e não separadamente para cada trem ou estação. São realizados dois experimentos simulando um dia de operação: um com *headway* fixo para todo o período e outro com cinco variações de *headway* de acordo com a variação de demanda. As conclusões indicam que o cenário com variação de *headway* apresenta melhor performance na ocupação dos trens e no tempo médio de espera no sistema comparado ao cenário com *headway* fixo. Os experimentos são limitados no sentido de obter comparações e indicadores eficientes de *headway*.

O estudo de Nunez et al (2010) apresenta uma visão geral dos softwares de simulação de transportes sobre trilhos disponíveis no âmbito acadêmico e comercial, indicando alguns requisitos necessários conforme cada objetivo e tipo de aplicação, especialmente no gerenciamento de sinalização; geração de programação de trens; gerenciamento de energia e controle em tempo real. É apresentado o modelo de simulação SimDimMetrô e é realizada a sua aplicação no metrô de Santiago com a avaliação de duas políticas de parada: *skip-stop*, em que as estações de maior demanda são priorizadas em detrimento das estações de menor demanda; e operação normal em que os trens param em todas as estações. Os resultados mostram que o tempo total médio de viagem no sistema é minimizado com a política *skip-stop*. Os resultados são limitados a comparar as duas políticas de operação.

O estudo de Dumbek e Celebi (2009) desenvolve um modelo de simulação do *Light Rail Transport System* de Istambul, Turquia, que funciona de forma semelhante a uma linha metroviária. São realizados dois experimentos com variação do *headway* e do número de trens e comparados os resultados do tempo médio de espera por estação com os valores reais do sistema. Os resultados mostram a diminuição do tempo de espera para valores menores de *headway* e indicam a necessidade de maior frota para melhoria do sistema. O modelo não mede a taxa de ocupação dos trens.

O modelo desenvolvido por Ballis et al. (2004) tem como objetivo determinar as melhorias necessárias na estrutura da linha metroviária de Istambul, Turquia, em termos de tamanho dos blocos de sinalização, tamanho da frota e composição dos trens, de forma a atender com eficiência três cenários de demanda de passageiros na hora de pico. Para cada cenário são simulados três *headways* diferentes. O modelo está mais focado no desempenho da linha em termos de número de trens e tempo de deslocamento, e não considera a dinâmica de embarque e desembarque dos passageiros e a variação da demanda ao longo do período. Os resultados apresentados buscam apenas validar o modelo quando comparado com o sistema real sem apresentar estatísticas referentes ao número de passageiros transportados ou tempo de espera.

O Quadro 2 apresenta um resumo das características dos modelos de simulação de cada estudo com relação ao software utilizado, à variável independente de controle e à distribuição de probabilidade utilizada para

representar a chegada dos passageiros nas estações. Os casos em que essas características não estão explicitadas no estudo estão indicados por hífen.

Quadro 2 – Características dos modelos de simulação

Autor	Linha aplicada	Software simulação	Variável independente	Distribuição da chegada de passageiros
Grube, P; Nunez, F; Cipriano, A	Santiago, Chile	Object-oriented programming in C# and MATLAB	Headway	Poisson com variação da taxa de chegadas
Nunez, F; Reyes, F; Grube, P; Cipriano, A	Santiago, Chile	Object-oriented programming in C# and MATLAB	Esquema normal e skip-stop de paradas	-
Ballis A., Liberis K., Moschovou T.	Atenas, Grécia	MetSim	Headway, frota de trens, tempo de parada nas estações	-
Schmaranzer D., Braune R., Doerner K.F.	Viena, Áustria	AnyLogic versão 7.0.3 e JGraphT versão 0.9.1	Headway e número de passageiros	Poisson com variação de taxas a cada período de 1 hora
You J., Guo W., Zhang Y., Hu J.	Beijing, China	MATLAB	-	-
Dumbek F., Celebi D.	Istambul, Turquia	Arena	Headway e número de trens.	Exponencial com variação de taxas a cada período de 1 hora

Fonte: Autor (2018)

3.4.

Análise dos estudos relacionados a modelos de otimização

O estudo de Yang et al. (2017) desenvolve um modelo matemático multiobjetivo não linear com os objetivos de minimizar o consumo de energia da rede e o tempo total de viagem dos trens utilizando como variáveis de decisão os perfis de velocidade do trem e o tempo de deslocamento entre as estações. O modelo é solucionado por um algoritmo genético e é aplicado no sistema metroviário de Beijing, China. O modelo não considera a demanda dinâmica de passageiros e a capacidade dos trens e o tempo a ser minimizado diz respeito somente ao deslocamento dos trens.

O modelo desenvolvido por Ding et al. (2016) é aplicado a linhas de longa distância que conectam o subúrbio de Shanghai, China, ao centro da cidade e tem como função objetivo definir a programação de parada dos trens em dois esquemas expresso/lento com o objetivo de minimizar o tempo médio de viagem total no sistema. O esquema é definido separando duas categorias de demanda de passageiros de acordo com a distância de suas estações de destino e formulado em um modelo matemático não linear. Um algoritmo relaciona equações matemáticas que expressam o tempo de viagem dos passageiros com uma matriz origem destino, porém o método de otimização não é explicitado no artigo. O modelo trabalha com uma taxa constante de chegada de passageiros e o resultado apresentado é baseado na média da matriz de tempo de viagem dos trens, não apresentando uma solução ótima para a programação de trens.

Shang et al. (2016) desenvolveram um modelo matemático não linear com o objetivo de definir a programação de trens para minimizar o tempo total de viagem dos passageiros no sistema. O tempo de viagem é calculado como a soma do tempo médio de espera nas estações e o tempo médio de viagem dos trens no sistema. A variável de decisão é o tempo de partida dos trens em cada estação e o modelo matemático é resolvido por um algoritmo *spatial branch and bound*. O modelo trabalha com uma taxa constante de chegada de passageiros na estação e não considera o limite de capacidade dos trens como uma restrição.

Sun et al. (2016) desenvolveram um modelo matemático não linear com a função objetivo de minimizar o tempo de espera dos passageiros e melhorar a performance de ocupação dos trens e o consumo de energia. O modelo utiliza

como variáveis de decisão o tempo de *headway*, o tempo de parada dos trens nas estações e o tempo de deslocamento entre as estações. O modelo matemático é resolvido por algoritmo genético e é realizada uma análise de sensibilidade em que os resultados indicam que a alteração das variáveis de tempo de parada nas estações e tempo de deslocamento do trem entre estações não provocam alteração nas variáveis de tempo de espera dos passageiros e ocupação dos trens. O algoritmo genético e a análise de sensibilidade não garantem a otimalidade dos resultados.

Xu et al. (2016) desenvolvem um modelo matemático não linear com a função objetivo de definir a programação de trens de forma a minimizar o tempo total dos passageiros no sistema e minimizar o consumo de energia estabelecendo um perfil de velocidade de acordo com o tamanho de cada segmento da linha. As variáveis de decisão são o tempo de deslocamento entre estações e o tempo de parada dos trens nas estações. O modelo é solucionado com um algoritmo genético. O modelo trabalha com taxas constantes de chegada passageiros por estação.

O modelo de Yang et al. (2014) tem como função objetivo definir a programação de trens de forma a minimizar o consumo de energia - por meio da maximização do uso de energia regenerada do sistema - e minimizar o tempo de espera dos passageiros nas estações utilizando como variáveis de decisão o tempo de *headway* e o tempo de parada dos trens nas estações. O problema é formulado em um modelo de programação matemática não linear e é solucionado com um algoritmo genético. Uma limitação importante do modelo é trabalhar somente com taxa constante de chegada de passageiros.

Sun et al. (2015) desenvolvem um modelo matemático não linear que tem como função objetivo definir a programação de trens de forma a minimizar o tempo de espera dos passageiros nas estações tendo como variável de decisão o tempo de parada dos trens nas estações. O modelo é adaptado em uma função dual Lagrangiana e solucionado por técnicas de gradiente como o método de Newton. O modelo trabalha com taxas constantes de chegada de passageiros e um número fixo de trens no sistema, limitações importantes na sua aplicação. Os resultados obtidos e descritos no artigo não expressam em unidade de tempo a espera dos passageiros mas referem-se apenas a quantidade de passageiros embarcados por estação.

Chao-Ming et al. (2013) desenvolvem um modelo matemático não linear com a função objetivo de definir a velocidade máxima do trem para cada trecho da linha de forma a maximizar a satisfação dos passageiros e/ou minimizar o consumo de energia dependendo do nível de demanda de cada período. Quando a demanda de passageiros do período é alta o objetivo de maior peso é a satisfação dos passageiros obtida com uma maior velocidade dos trens, quando a demanda é baixa, a prioridade para a ser a maior economia de energia, obtida com velocidades mais lentas. A variável de decisão é a velocidade do trem e o modelo matemático é solucionado por um algoritmo genético. O modelo trabalha com taxas constantes de chegada de passageiros a cada período e não considera a capacidade do trem como restrição.

O estudo de Liebchen (2008) desenvolve um algoritmo matemático de otimização baseado em grafos com função objetivo linear que busca definir a programação de trens para minimizar o tempo de espera de passageiros nas estações de transferência entre linhas e minimizar o número de trens utilizados na rede. O problema é classificado como NP-Hard e é utilizado como método de solução um algoritmo genético. O autor destaca que sua aplicação no sistema metroviário de Berlin foi o primeiro exemplo de uma aplicação prática real de um modelo de otimização. Uma limitação importante do modelo é não considerar a restrição de capacidade dos trens.

O Quadro 3 apresenta as características dos modelos de otimização de cada estudo com relação à variável de decisão, ao método de otimização e à distribuição de probabilidade utilizada para representar a chegada dos passageiros nas estações. Os casos em que essas características não estão explicitadas no estudo estão indicados por hífen.

Quadro 3 – Características dos modelos de otimização

Autor	Linha aplicada	Variável de decisão	Método de otimização	Distribuição da chegada de passageiros
Liebchen, Christian	Berlin, Alemanha	Programação dos trens no sistema	Algoritmo matemático baseado em grafos com função objetivo linear e solucionado por algoritmo genético	-

Yang X., Ning B., Li X., Tang T.	Beijing, China	Headway e tempo de parada dos trens	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo genético	Taxa constante por estação
Xu X., Li K., Li X.	Beijing, China	Tempo de deslocamento e tempo de parada dos trens	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo genético	Taxa constante por estação
Sun X., Zhang S., Dong H., Chen Y., Zhu H.	Beijing, China	Tempo de parada dos trens nas estações	Modelo matemático não linear solucionado por decomposição e função Lagrangiana dual.	Taxa constante por estação
Yang, Xin; Chen, Anthony; Ning, Bin; Tang, Tao	Beijing, China	Perfis de velocidade do trem e tempo de deslocamento	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo genético	-
Ding X., Yang X., Hu H., Liu Z., Pan H.	Shanghai, China	Programação dos trens em 2 esquemas: expresso e lento.	Modelo matemático não linear. Método de otimização não demonstrado	Poisson
Sun X., Lu H., Dong H., Xun J.	Beijing, China	Headway, tempo de parada e tempo de deslocamento	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo genético	Distribuição Normal
Shang P., Li R., Yang L.	Beijing, China	Programação dos trens no sistema	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo spatial branch and bound	Taxa constante para o sistema
Chao-Ming H., Pei-Pei C., Mao Z., Meng-Zi C., Lei L.	-	Velocidade do trem em cada trecho da linha	Modelo matemático não linear solucionado por algoritmo genético	Taxa constante para o sistema

3.5.

Análise dos estudos relacionados a modelos de simulação e otimização

O modelo de Stoilova e Stoev (2017) tem como função objetivo encontrar a melhor rota de trens dentro de uma rede metroviária para minimizar a quantidade de trem-quilômetros rodados no sistema e utiliza como variável de decisão a escolha de rotas para cada trem dentro da rede. Os autores utilizam os resultados do modelo de simulação para realizar uma análise de regressão e posteriormente aplicam a equação de regressão em um modelo de programação linear como método de otimização. O modelo pode ser aplicado especialmente em

sistemas metroviários cujas redes possibilitem a escolha de um número significativo de rotas diferentes para operação. O estudo é aplicado no sistema metroviário de Sofia, Bulgária.

O estudo de Halim et al. (2016) tem como função objetivo minimizar o tempo médio de espera dos passageiros nas plataformas e a taxa de ocupação média dos trens e utiliza como variável de decisão a escala de partida de trens na estação inicial assumindo a possibilidade de variação de *headway* dentro de limites pré-estabelecidos. Como método de otimização utilizam em uma primeira etapa um modelo de programação matemática inteira para gerar programações viáveis de trens e em seguida aplicam as programações no modelo de simulação para posterior análise dos resultados. A principal métrica utilizada é o tempo médio de espera dos passageiros nas plataformas cujo cálculo considera o período do experimento como um todo, o que representa uma importante limitação do modelo pois não permite a análise de desempenho em cada estação separadamente. O estudo é aplicado no metrô do Cairo, Egito.

O estudo de Shahi et al. (2016) é aplicado no metrô de Teerã, Irã, e tem como objetivo minimizar o tempo médio de viagem dos passageiros no sistema e aumentar a taxa de ocupação dos trens. Utiliza como principal métrica o tempo médio de viagem dos passageiros. Os resultados de um modelo de simulação são utilizados nos métodos *Response Surface Methodology* e *Weighed Metric Method* em que é realizada uma regressão matemática de forma a identificar parâmetros e formular a equação que melhor represente a relação entre a variável *headway* e as variáveis de respostas - tempo médio de viagem e taxa de ocupação no trem. O modelo matemático não linear é solucionado pelo método *Sequential Quadratic Programming*. O desempenho da taxa de ocupação dos trens é calculado considerando os números absolutos do período diário de todo o sistema, i. e., é baseada na soma total de passageiros do período dividida pela capacidade total de trens sem considerar a variação da ocupação ao longo do período e em cada estação.

O modelo de Sahelgozin e Alimohammadi (2015) tem como objetivo minimizar o tempo total de viagem dos passageiros, os custos operacionais e o consumo de energia do sistema e utiliza como variável de decisão os tempos e taxas de aceleração e frenagem dos trens e os tempos de parada do trem nas plataformas. No estudo é feita a análise de sensibilidade dos resultados do modelo

de simulação para determinar a inter-relação entre as variáveis, representadas posteriormente em funções matemáticas. Dessa forma, a validade dos resultados representados pelas funções é altamente dependente da acuracidade dos resultados do modelo de simulação. O método de otimização é definido como *Multi-Criteria Subway Schedule Optimization* (MCSSO) e é utilizado um algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II para buscar a melhor solução representada na forma de uma programação dos trens. O estudo é aplicado no metrô de Teerã, Irã, e o melhor resultado encontrado quando comparado aos dados reais apresenta melhoria nos indicadores de tempo total de viagem dos passageiros e custos operacionais mas apresenta piora no indicador de consumo de energia.

O modelo de Hassannayebi et al. (2014) tem como função objetivo minimizar o tempo médio de espera dos passageiros nas plataformas e utiliza como variável de decisão o tempo de *headway*. Utiliza como método de otimização um algoritmo genético para gerar diferentes programações de *headway* para um dia de operação e necessita da posterior aplicação das programações no modelo de simulação para avaliação dos resultados. Uma limitação importante do modelo é que ele não considera a taxa de ocupação dos trens e o número de viagens de trens no período aplicado. O estudo é aplicado no metrô de Teerã, Irã.

O modelo desenvolvido por Reyes e Cipriano (2012) tem como objetivo estimar o número de passageiros no trem e em espera nas estações por meio de inferência estatística sobre as variáveis independentes de tempo de parada do trem nas estações e número de entrada de passageiros na estação. Sua métrica de performance está relacionada ao menor erro na estimação das variáveis, isto é, na acuracidade do modelo em estimar as variáveis dependentes de número de passageiros no trem e em espera nas estações. A estimação das variáveis é buscada experimentalmente pela análise de sensibilidade dos resultados gerados em um modelo de simulação com uma abordagem denominada *Moving Horizon Estimation*. Os objetivos estão relacionados com a melhor representação das variáveis de ocupação do trem e de passageiros em espera nas estações, mas não obtém de fato uma otimização do sistema e de seu desempenho operacional.

O modelo de Yalçinkaya e Mirac (2009) tem como objetivo minimizar o tempo médio de viagem dos passageiros no sistema para uma determinada taxa de ocupação dos trens. Os resultados do modelo de simulação são utilizados no método *Response Surface Methodology* para a identificar os parâmetros e

formular a equação matemática que melhor represente a relação entre a variável independente (*headway*) e as variáveis de resposta (tempo médio de viagem e taxa de ocupação no trem). Baseado nas equações formuladas o estudo utiliza a técnica de *Derringer-Suich multi-response optimization* procedure para encontrar o valor ótimo do *headway*. A taxa de ocupação dos trens é calculada com os números absolutos do período diário, i. e., é baseada na soma total de passageiros embarcados no dia dividida pela capacidade total de trens no período, sem considerar a sua variação ao longo do período.

O modelo de Vázquez-Abad e Zubieta (2005) é aplicado em uma rede metroviária genérica e tem como função objetivo minimizar o número total de viagens de trem por linha e o tempo total de espera dos passageiros no sistema. O modelo matemático não linear utiliza como variável de decisão o tempo de *headway* e utiliza *Gradient-based methods* como método de otimização. Um modelo de simulação de eventos discretos é criado utilizando o *SSC simulation library* e é aplicado para gerar resultados numéricos para fins de comparação e validação do modelo matemático. Uma limitação importante está no uso da estatística de tempo total de espera dos passageiros no sistema como critério de minimização, desconsiderando o tempo de espera separadamente nos períodos de pico e por estação.

O Quadro 4 apresenta as características dos estudos que utilizam modelos de simulação e otimização com relação à função objetivo, à variável de decisão, ao software de simulação, ao método de otimização e à distribuição de probabilidade utilizada para representar a chegada dos passageiros nas estações. Os casos em que essas características não estão explicitadas no estudo estão indicadas por hífen.

Quadro 4 – Características dos modelos de simulação e otimização

Autor	Linha aplicada	Variável de decisão	Software simulação	Método de otimização	Chegada de passageiros
Stoilova S., Stoev V.	Sofia, Bulgaria	Rotas de trens dentro da rede	Arena V.14.0	Regressão com resultados de simulação e posterior uso em programação linear para otimização	Poisson

Halim H.I., Sakr M.A., Aly W.M.	Cairo, Egito	Hora de partida dos trens	-	Programação linear inteira para gerar programações viáveis de trens e posterior análise no modelo de simulação	Poisson
Shahi, MRM; Mehdipour, EF; Amiri, M	Teerã, Irã	Headway	Simulink e Matlab	Modelo matemático não linear, Response Surface Methodology e Weighed Metric Method	Poisson
Sahelgozin M., Alimoham madi A.	Teerã, Irã	Taxas de aceleração e frenagem dos trens e tempo de plataforma	MATLAB 2013	Modelo matemático não linear e algoritmo genético NSGA-II	-
Hassannaye bi, E; Sajedinejad , A; Mardani, S	Teerã, Irã	Headway	Enterprise Dynamics	Algoritmo genético para gerar programações de trens e posterior aplicação no modelo de simulação	Poisson
Yalçinkaya O., Mirac Bayhan G.	-	Headway	Arena V.2.2	Regressão com resultados de simulação e posterior aplicação Response Surface Methodology e Derringer-Suich multi-response optimization	Poisson
Vázquez- Abad F.J., Zubieta L.	-	Headway	SSC Simulation Libray.	Modelo matemático não linear e Gradient- based methods	Poisson
Reyes F., Cipriano A.	Santiago, Chile	Tempo de parada dos trens e número de passageiros na estação	-	Análise de sensibilidade dos resultados da simulação e abordagem Moving Horizon Estimation.	Uniforme por estação

Fonte: Autor (2018)

3.6. Contribuições da pesquisa

A análise dos 23 artigos selecionados mostra que existem diferentes abordagens, objetivos e métodos utilizados no desenvolvimento e aplicação de modelos de simulação e otimização em problemas de transporte de passageiros

em sistemas metroviários. Nesta seção serão apresentadas as contribuições dos modelos desenvolvidos neste trabalho.

Um aspecto diferenciado deste trabalho está na utilização de um estudo de previsão de demanda e da sua matriz origem destino no sistema metroviário juntamente com uma matriz da distribuição percentual de viagens ao longo do período de pico da manhã para representar a chegada de passageiros nas estações. Na literatura pesquisada não foram utilizados estudos de previsão de demanda e nota-se uma lacuna na análise da variação da chegada de passageiros ao longo dos períodos de pico. Embora nove estudos indiquem a utilização da distribuição de Poisson para representar a chegada de passageiros nas estações, nenhum deles demonstra os parâmetros utilizados e somente três estudos (Chao-Ming et al., 2013, Shahi et al., 2016 e Yalçinkaya e Mirac, 2009) indicam a realização de teste de aderência estatística utilizando dados reais porém sem a demonstração de parâmetros ou qualidade dos testes.

Com relação ao modelo de simulação desenvolvido, a principal contribuição deste trabalho está no uso da métrica da taxa de ocupação média e máxima dos trens separadamente em cada estação e sua aplicação na análise do desempenho e busca por melhoria do sistema por meio de experimentos com diferentes tempos de *headway* e diferentes capacidades dos trens. Os modelos de simulação que utilizam a estatística de taxa de ocupação dos trens (Schmaranzer et al., 2016 e Grube et al., 2011) consideram no seu cálculo o sistema metroviário como um todo e não separadamente para cada estação, limitando dessa forma a sua aplicação na análise de desempenho do sistema. A construção do modelo de simulação no software Arena realizada neste trabalho também difere dos outros modelos e mesmo os estudos que utilizam o mesmo software de simulação (Stoilova e Stoev, 2017, Yalçinkaya e Mirac, 2009, Dumbek e Celebi, 2009) utilizam blocos, relações e funções diferentes.

O modelo de otimização desenvolvido neste trabalho apresenta uma abordagem diferenciada com relação aos outros estudos pesquisados e tem como objetivo encontrar a exata adequação do valor de *headway* para atender a uma demanda de passageiros de forma que o sistema seja capaz de garantir todos os embarques de passageiros sem gerar sobrelotação dos trens e respeitando a sua capacidade. O modelo é construído como um modelo de programação linear inteira mista (MIP) em que a função objetivo é a maximização do *headway* sujeita

às restrições de capacidade, tempo de deslocamento do trem e demanda dinâmica dos passageiros. Dessa forma busca-se balancear a maximização do nível de serviço aos passageiros ao garantir todos os embarques sem gerar sobrelotação e a minimização de custos de operação com a maximização do *headway* que implica na menor quantidade de frotas em operação. Outro aspecto importante do modelo MIP desenvolvido é que sua formulação e método exato de solução garante a otimalidade dos resultados enquanto a maioria dos estudos que formulam modelos não lineares e são solucionados por algoritmos metaheurísticos não garantem a otimalidade.

A metodologia utilizada para a construção, validação e implementação dos modelos de simulação e otimização estão descritos nos próximos capítulos.

4

Modelo de simulação de eventos discretos

De um ponto de vista prático, Kelton et al. (2004) definem simulação como o processo de criar e implementar um modelo computacional de um sistema proposto ou real com o objetivo de realizar experimentos numéricos que proporcionem a melhor compreensão do comportamento do sistema para um dado conjunto de condições, especialmente quando usado em sistemas complexos.

O funcionamento de uma linha metroviária no transporte de passageiros envolve o deslocamento de trens com uma série de carregamentos e descarregamentos ao longo do tempo, submetidas a um conjunto de restrições estruturais, de tempo e capacidade, que adquire grande complexidade quando relacionada a uma demanda dinâmica de passageiros. Por envolver grande complexidade e por ser muito difícil e custoso realizar experimentos práticos do seu sistema, a concepção e implementação de um modelo de simulação torna-se um recurso aplicável para a sua análise.

Neste capítulo é apresentada a metodologia de simulação, a análise e coleta de dados, a concepção e implementação do modelo de simulação, os experimentos e análise de resultados do modelo.

4.1. Metodologia de modelagem e simulação

Chwif e Medina (2014) destacam três categorias básicas para classificação dos modelos de simulação computacional: simulação de Monte Carlo, relacionado aos geradores de números aleatórios; simulação contínua, utilizada para modelar sistemas cujo estado varia continuamente no tempo e em que normalmente utiliza-se equações diferenciais para cálculo da mudança das variáveis; e simulação de eventos discretos, utilizado para modelar sistemas que mudam o seu estado a partir da ocorrência de eventos em momentos discretos do tempo, caso do modelo desenvolvido nessa pesquisa.

A metodologia utilizada na modelagem e simulação segue o método proposto por Chwif e Medina (2014) com as etapas de concepção, implementação e análise dos resultados. A Figura 3 apresenta uma representação da metodologia.

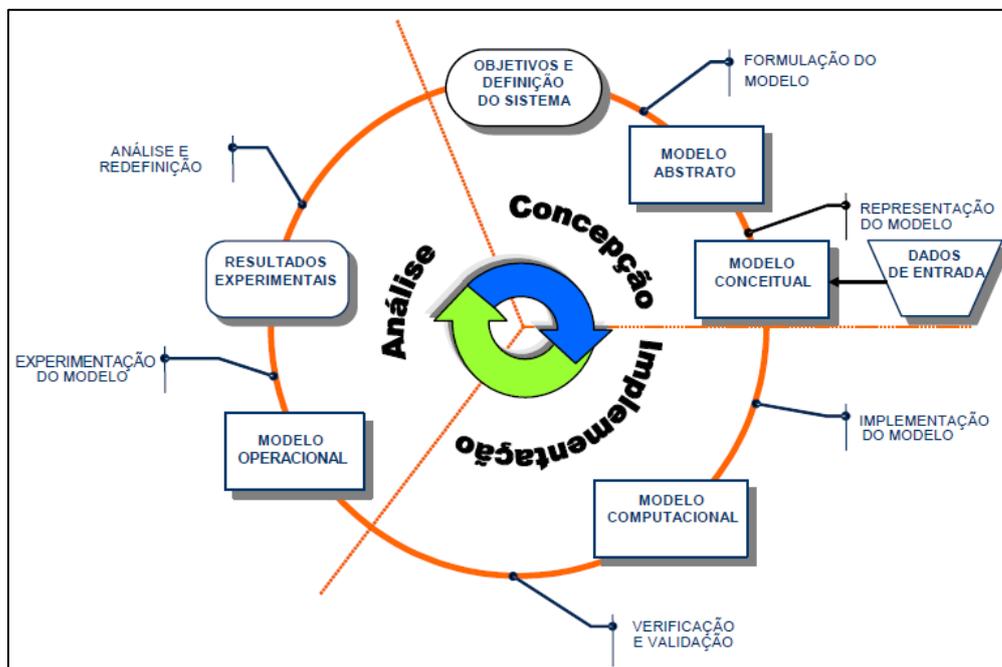


Figura 3 - Metodologia de modelagem e simulação de eventos discretos

Fonte: Chwif e Medina, 2014

Na etapa de concepção deve-se entender claramente o sistema a ser modelado, seus objetivos, variáveis relevantes, suas hipóteses e o nível de detalhamento. Também nessa etapa são coletados os dados de entrada e é elaborado um modelo conceitual do sistema a ser simulado.

Na etapa de implementação o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional por meio de uma linguagem de simulação ou de um simulador comercial. No presente estudo foi utilizado o software Arena para a implementação do modelo. Também nessa etapa o modelo implementado deve ser comparado frente ao modelo conceitual e resultados devem ser gerados para que o modelo seja verificado e validado de forma a comprovar que ele é uma representação precisa da realidade, dentro dos objetivos já estipulados.

Na terceira etapa, com o modelo já implementado, são realizados os experimentos com rodadas do modelo de simulação, documentação e análise dos resultados para gerar conclusões e recomendações sobre o sistema.

4.2. Análise e coleta de dados

O município do Rio de Janeiro tem uma população estimada em 6.520.266 habitantes, com densidade demográfica de 5.265,82 habitantes por quilômetro quadrado e é a segunda maior cidade do Brasil em número de habitantes de acordo com dados de 2017 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Diante das necessidades de mobilidade urbana e dos preparativos para sediar grandes eventos internacionais - Copa do Mundo em 2014 e Jogos Olímpicos em 2016 - realizou entre os anos de 2011 e 2016 um grande investimento na expansão de suas infraestruturas de transporte coletivo de passageiros. Fez parte dessa expansão a construção e implementação de linhas rodoviárias de Bus Rapid Transit (BRT), da rede de Veículos Leves sobre Trilhos (VLT) e da Linha 4 em sua rede metroviária.

O Plano Diretor de Transportes Urbanos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro de 2015 (PDTU, 2015) aponta que entre as áreas de planejamento da cidade, a área 4, correspondente à zona oeste da cidade, foi a que apresentou a maior taxa de crescimento populacional entre os anos 1991 e 2014 com uma taxa total de 80% e um crescimento absoluto de mais de 420 mil habitantes. O PDTU 2015 também indica que a área de planejamento 1 – centro da cidade - é a área que concentra a maior parte dos empregos do município com aproximadamente 1,33 milhões de empregos em 2015 e corresponde à principal zona de atração dos fluxos diários de transporte de passageiros na região metropolitana.

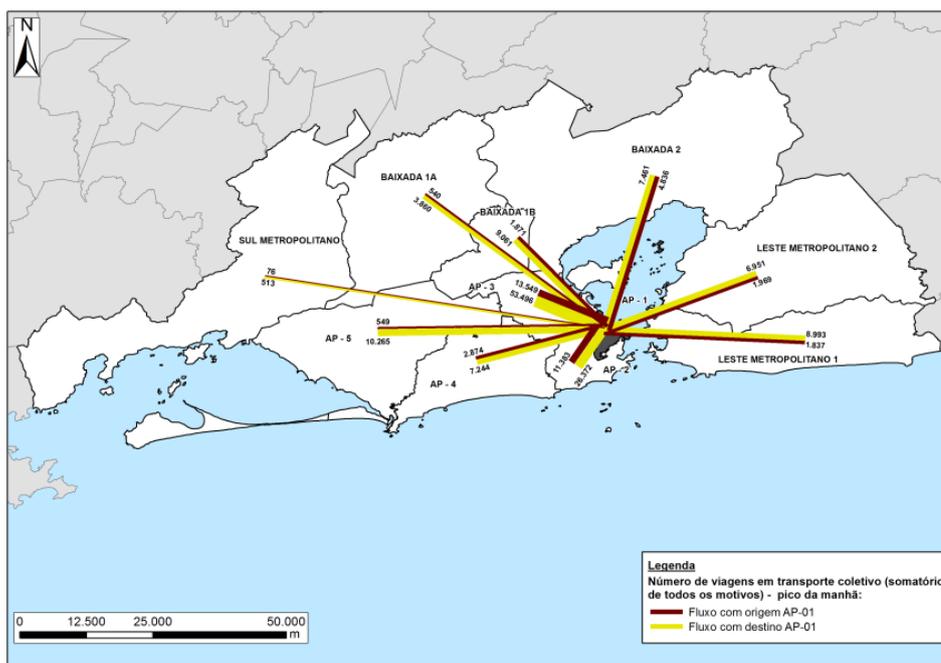


Figura 4 - Somatório dos motivos de transporte coletivo na Região Metropolitana do Rio de Janeiro com destino à AP1 no pico da manhã. Fonte: PDTU, 2015.

A Figura 4 ilustra as demandas e fluxos de transporte de passageiros entre as diferentes áreas de planejamento da região metropolitana e a área de planejamento 1. A Linha 4 do sistema metroviário do Rio de Janeiro por meio da sua integração com a Linha 1 possibilita a ligação da zona oeste com a zona central da cidade.

A estrutura do sistema metroviário da Linha 4 tem aproximadamente 16 quilômetros de extensão e 7 estações, ligando a estação Jardim Oceânico, situada no bairro da Barra da Tijuca na zona oeste, à estação General Osório, situada no bairro de Ipanema na zona sul. Na estação General Osório ocorre a integração com a Linha 1 do sistema, que segue até a zona central da cidade. A Figura 5 ilustra os tempos médios e o desenho da Linha 4.

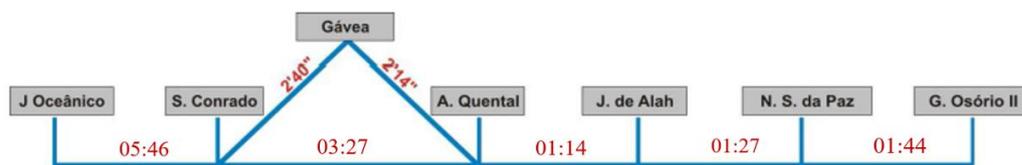


Figura 5- Tempos médios da linha 4 do Metrô (adaptado do Estudo de Demanda da Linha 4, FGV, 2011).

A frota adquirida para operação da Linha 4 se compõe de 15 trens compostos de seis vagões cada e capacidade máxima de 1800 pessoas por trem –

considerando uma densidade máxima de 6 pessoas por metro quadrado - de acordo com boletins divulgados pela concessionária MetrôRio, responsável pela operação do sistema metroviário, e pela Concessionária Rio Barra, responsável pelas obras da Linha 4.

O Metrô do Rio de Janeiro opera com *headway* cíclico, isto é, com valores fixos de *headway* em determinados períodos. Halim et al. (2016) destacam que normalmente as linhas metroviárias utilizam *headway* cíclicos com possíveis variações por períodos de uma hora objetivando atender a variação da demanda. As vantagens associadas à utilização do *headway* cíclico nos sistemas metroviários estão associadas à simplificação da operação do sistema e à fácil compreensão e previsão de tempo de espera pelo usuário. No início de sua operação em 2016 a Linha 4 operava com *headway* fixo de 8 minutos e no mês de fevereiro de 2018 operava com *headway* de 4,5 minutos no período de pico da manhã.

Para o cálculo dos tempos médios de deslocamento e paradas nas estações foi utilizado um cronômetro para realizar medições in loco dos tempos reais dentro do horário de pico da manhã em dias úteis comuns nos meses de novembro de 2017 e fevereiro de 2018. Foram registradas 10 amostras de cada deslocamento e parada e os tempos médios calculados estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Tempos médios da Linha 4

Segmento	Tempo médio de deslocamento (min:seg)
Jardim Oceânico - São Conrado	05:46
Plataforma São Conrado	00:25
São Conrado - Antero de Quental	03:27
Plataforma Antero de Quental	00:20
Antero de Quental - Jardim de Alah	01:14
Plataforma Jardim de Alah	00:20
Jardim de Alah - N. S. da Paz	01:27
Plataforma N.S. da Paz	00:23
N.S. Paz - General Osório	01:44
Total	15:06

Foram realizadas duas visitas técnicas ao centro operacional da MetrôRio para obter detalhes sobre a sua operação e informações relacionadas à distribuição da demanda de passageiros. De acordo com os operadores, nos períodos de pico

de demanda o sistema opera considerando a capacidade máxima de 1800 passageiros por trem – assumindo o limite de 6 passageiros por metro quadrado – e fora desses períodos o sistema opera considerando uma capacidade máxima de 1200 passageiros por trem – assumindo o limite de 4 passageiros por metro quadrado. É importante ressaltar que esses limites de capacidade são relativos ao nível de serviço (em termos de densidade de passageiros por metro quadrado) e não à uma capacidade real do trem. O menor tempo de *headway* que o sistema é opera é de 2,25 minutos por questões de segurança e devido às limitações de sinalização do sistema que utiliza sinalização de blocos fixos.

Os dados operacionais do sistema, referentes ao funcionamento da Linha 4 em outubro de 2016, estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Dados operacionais da Linha 4 em outubro de 2016

Frota máxima	15 trens
Período de pico da manhã	6:30 às 9:30
Capacidade do trem (período de pico)	1800 pessoas (6 <i>pax/m²</i>)
Capacidade do trem (período de vale)	1200 pessoas (4 <i>pax/m²</i>)
Headway mínimo (min:seg)	02:15
Headway em 2016 (min:seg)	08:00

O projeto da Linha 4 do metrô do Rio de Janeiro foi objeto do Estudo de Demanda para Linha 4, estudo encomendado pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro à Fundação Getúlio Vargas com o objetivo de dar suporte à análise da viabilidade econômico e financeira do projeto e ao dimensionamento da capacidade estrutural do seu sistema (FGV, 2011). O Estudo apresenta uma estimativa detalhada da demanda de passageiros no sistema metroviário com a inclusão da Linha 4 em sua rede.

A matriz origem–destino disponibilizada no Estudo de Demanda da Linha 4 com a previsão de demanda para o período de pico da manhã para o ano de 2016 foi utilizada como referência para modelar a demanda de passageiros no modelo de simulação. A matriz original apresenta a demanda de passageiros da Linha 4 pontualmente entre cada estação de origem e destino do sistema metroviário do Rio de Janeiro. Os dados foram então calculados de forma a encontrar a demanda total de passageiros em cada estação da Linha 4 dentro do período analisado e a

porcentagem de desembarque em cada estação da linha. Esses dados estão descritos na Tabela 4.

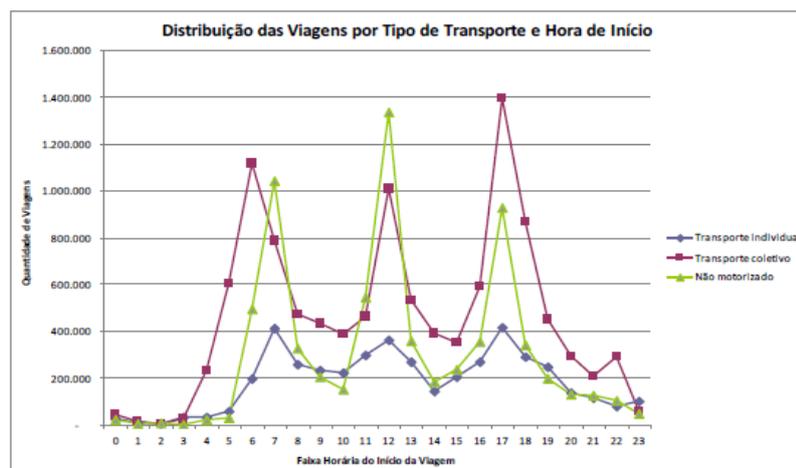
Tabela 4 - Demanda prevista para o período de pico da manhã (6:30 às 9:29).

Estações (sentido Jd Oceânico - Gen. Osorio)	Embarque (passageiros)	Desembarque (passageiros)	Acumulado de passageiros após desembarque	Desembarque (Porcentagem de passageiros)
Jardim Oceânico	28695	-	28695	-
São Conrado	10961	2635	37021	9,18%
Antero de Quental	3027	4138	35910	11,18%
Jardim de Alah	1994	2111	35793	5,88%
Nossa Senhora da Paz	3925	3715	36003	10,38%
General Osorio	-	36003	0	100,00%
Total	48602	48602	-	-

Fonte: Adaptado do Estudo de Demanda para a Linha 4 (FGV, 2011)

Os dados apresentados na matriz origem–destino fornecem a demanda total de passageiros dentro do período de pico, no entanto a distribuição da chegada de passageiros ao longo do período não é uniforme e o seu comportamento deve ser considerado para que o modelo de simulação represente a dinâmica real do sistema e tenha resultados efetivos.

As Figuras 6 e 7 ilustram respectivamente a distribuição das viagens por tipo de transporte ao longo do dia e a variação do fluxo de passageiros nas Linhas 1 e 2 do metrô no Rio de Janeiro. Analisando os gráficos nota-se um comportamento típico das demandas de viagens pendulares em que ocorre um pico de demanda no período da manhã, com a dominância de jornadas no sentido residência-trabalho, um aumento médio próximo ao meio-dia - período de almoço - e um novo pico de demanda no fim da tarde com a dominância de jornadas no sentido trabalho-residência (Hutchinson, 1979).



Fonte: Consórcio Halcrow-Sinergia-Setepla

Figura 6- Distribuição de viagens por tipo de transporte

Fonte: PDTU 2015

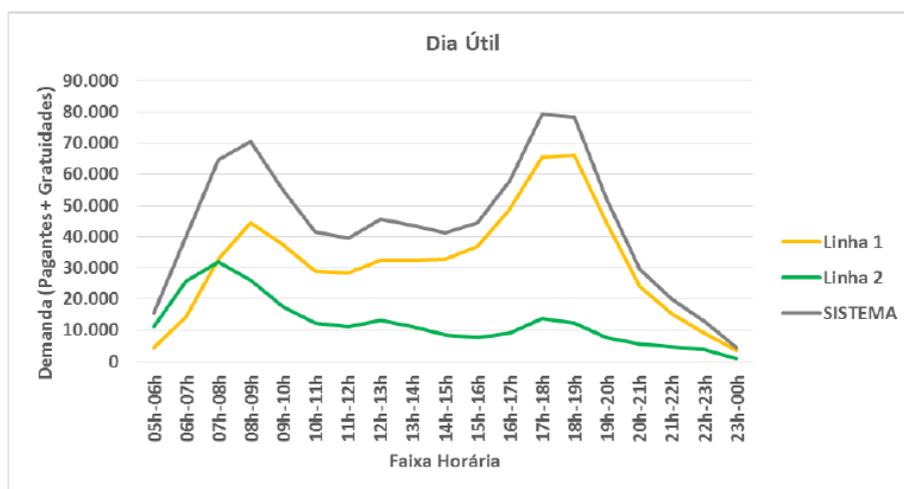


Figura 7- Variação do fluxo de passageiros nas Linhas 1 e 2 do Metrô

Fonte: PMUS 2015.

Para representar a distribuição da demanda no período de pico da manhã foi solicitado à gerência de inteligência de mercado do MetrôRio informações relativas à distribuição de chegadas de passageiros e a empresa forneceu uma matriz com o percentual do volume de passageiros a cada dez minutos considerando o volume total no período de pico da manhã – de 6:30 às 9:30 – em cada estação da Linha 4. De acordo com a empresa os dados foram obtidos com os registros das roletas de acesso às estações da Linha 4 e corresponde à distribuição da demanda real nos dias úteis do mês de novembro de 2017. O quadro 5 mostra a matriz com os percentuais de chegadas.

A matriz com a distribuição percentual das demandas foi então utilizada para distribuir a demanda total prevista para o ano de 2016 expressa na Tabela 4 a

partir da multiplicação das porcentagens de cada célula da matriz pela demanda total prevista para cada estação, obtendo-se dessa forma, após arredondamento dos resultados, uma nova matriz com o volume de demanda em cada estação distribuído por cada intervalo de 10 minutos no período de pico da manhã conforme expresso no Quadro 6. O gráfico da Figura 8 ilustra o comportamento da distribuição da demanda para cada estação ao longo do período.

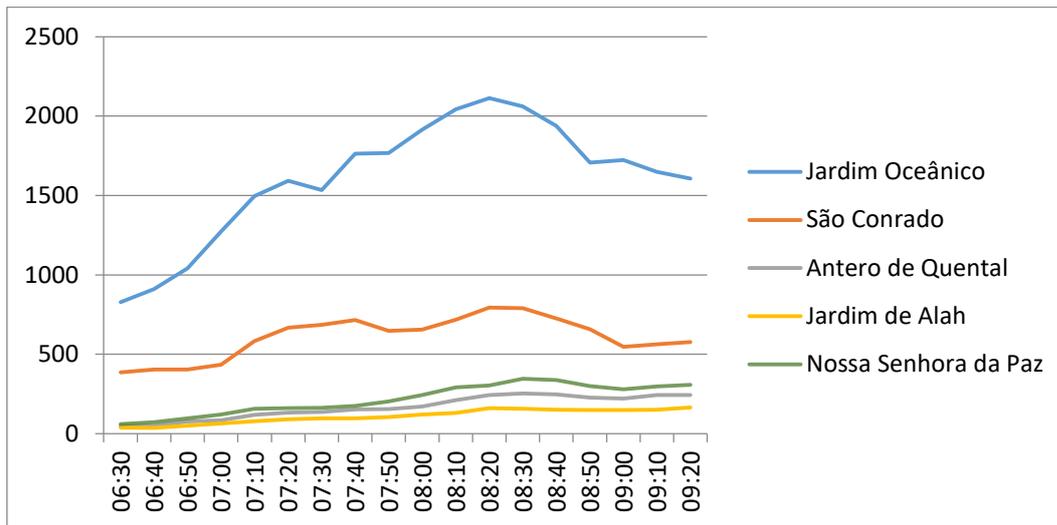


Figura 8 - Distribuição da demanda para cada estação ao longo período de pico da manhã.

Fonte: Autor (2018)

Para modelar o processo estocástico de chegada de passageiros nas estações foi assumido um processo aleatório de Poisson. O processo de Poisson é comumente utilizado para representar situações que envolvam a contagem de ocorrências de eventos em um intervalo de tempo assumindo a propriedade de independência entre os eventos, como por exemplo a chegada de clientes em uma central de serviços (Phillips et al., 1976). Nos artigos pesquisados na revisão da literatura a distribuição de Poisson foi a mais utilizada para representar a chegada de passageiros nas estações. No software Arena a chegada de entidades no sistema é configurada em termos do intervalo de tempo entre chegadas e em um processo de Poisson a distribuição do tempo entre chegadas segue uma distribuição exponencial negativa. Nesse sentido, foi utilizado no Arena a distribuição exponencial com o parâmetro do tempo médio entre chegadas para modelar a chegada de passageiros nas estações. Os valores do tempo médio entre chegadas foram calculados com a divisão de cada intervalo de dez minutos – seiscentos segundos - pela demanda de passageiros prevista para aquele período e estão descritos no Quadro 7.

Quadro 5 – Distribuição percentual das chegadas de passageiros na Linha 4 no período de pico da manhã em novembro de 2017.

Estação	06:30	06:40	06:50	07:00	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00	09:10	09:20
Jardim Oceânico	2,86%	3,15%	3,60%	4,39%	5,17%	5,50%	5,30%	6,09%	6,10%	6,61%	7,05%	7,29%	7,12%	6,69%	5,89%	5,95%	5,69%	5,55%
São Conrado	3,53%	3,69%	3,69%	3,97%	5,32%	6,08%	6,25%	6,54%	5,92%	5,99%	6,54%	7,25%	7,21%	6,62%	6,01%	4,99%	5,14%	5,26%
Antero de Quental	1,66%	1,69%	2,56%	2,83%	3,91%	4,38%	4,54%	5,07%	5,10%	5,69%	7,01%	8,02%	8,37%	8,19%	7,55%	7,35%	8,05%	8,02%
Jardim de Alah	1,98%	1,83%	2,58%	3,23%	3,95%	4,57%	4,89%	4,89%	5,27%	6,09%	6,56%	8,04%	7,86%	7,56%	7,46%	7,44%	7,56%	8,24%
Nossa Senhora da Paz	1,56%	1,84%	2,45%	3,09%	4,01%	4,10%	4,14%	4,49%	5,20%	6,20%	7,44%	7,73%	8,84%	8,64%	7,66%	7,13%	7,60%	7,87%

Fonte: MetrôRio

Quadro 6 – Volume de demanda em cada estação distribuído por cada intervalo de 10 minutos no período de pico da manhã.

Estação	06:30	06:40	06:50	07:00	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00	09:10	09:20	Total
Jardim Oceânico	829	912	1042	1272	1497	1592	1535	1763	1767	1914	2043	2112	2061	1939	1707	1723	1649	1607	28965
São Conrado	387	404	404	435	584	667	686	716	649	657	717	795	791	725	658	546	563	577	10961
Antero de Quental	50	51	78	86	118	133	138	153	154	172	212	243	253	248	229	223	244	243	3027
Jardim de Alah	40	36	51	64	79	91	97	97	105	121	131	160	157	151	149	148	151	164	1994
Nossa Senhora da Paz	61	72	96	121	158	161	163	176	204	243	292	303	347	339	300	280	298	309	3925

Fonte: Autor (2018)

Quadro 7 – Parâmetros de tempo médio entre chegadas em segundos utilizado na distribuição exponencial.

Estação	06:30	06:40	06:50	07:00	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00	09:10	09:20
Jardim Oceânico	0,72	0,66	0,58	0,47	0,4	0,38	0,39	0,34	0,34	0,31	0,29	0,28	0,29	0,31	0,35	0,35	0,36	0,37
São Conrado	1,55	1,48	1,48	1,38	1,03	0,9	0,88	0,84	0,92	0,91	0,84	0,75	0,76	0,83	0,91	1,1	1,07	1,04
Antero de Quental	11,96	11,76	7,74	7	5,07	4,53	4,36	3,91	3,89	3,48	2,83	2,47	2,37	2,42	2,62	2,7	2,46	2,47
Jardim de Alah	15,18	16,49	11,66	9,32	7,61	6,58	6,16	6,16	5,71	4,94	4,59	3,74	3,83	3,98	4,03	4,04	3,98	3,65
Nossa Senhora da Paz	9,78	8,29	6,25	4,95	3,81	3,73	3,69	3,4	2,94	2,47	2,05	1,98	1,73	1,77	2	2,14	2,01	1,94

Fonte: Autor (2018)

4.3. Concepção e implementação do modelo de simulação

O modelo conceitual para o trabalho foi elaborado a partir da observação da dinâmica e movimentações do transporte de passageiros nas estações da Linha 4 do Metrô. O *framework* do modelo está representado na Figura 9. Em cada estação da linha tem-se uma taxa de chegada de passageiros que varia ao longo do tempo de acordo com a variação da demanda. Os passageiros que chegam às estações se dirigem à plataforma de embarque e aguardam a chegada de uma composição do metrô, que ocorre em um intervalo de tempo definido como o *headway* do sistema. O embarque dos passageiros está condicionado à disponibilidade do trem na plataforma e à disponibilidade de lugares vagos dentro da composição. O desembarque dos passageiros varia de acordo com a demanda pelo destino de cada estação e é sempre uma parcela dos passageiros do trem.

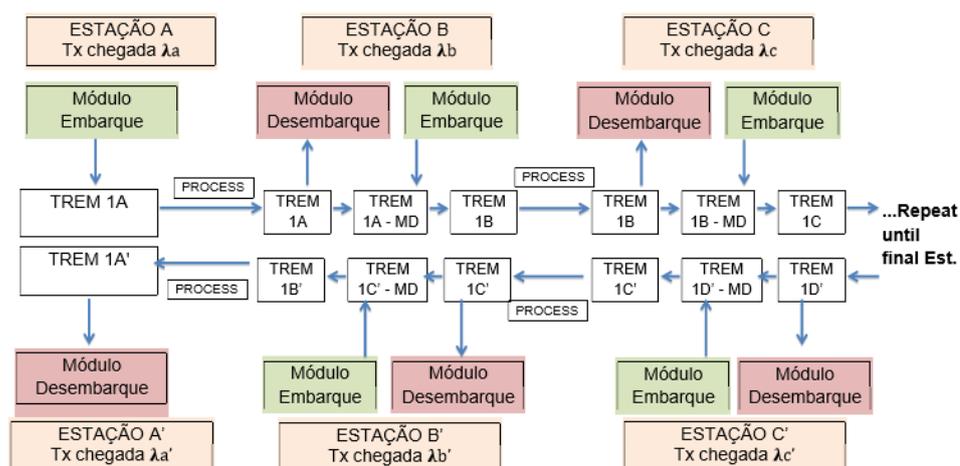


Figura 9 - Modelo conceitual da linha 4 do metrô.

Devido a limitação de dados algumas simplificações foram necessárias na construção do modelo. A Linha 4 foi inaugurada em julho de 2016 ainda sem o funcionamento da Estação Gávea que até o momento de conclusão dessa dissertação está sem previsão para entrar em operação. Por essa razão a estação Gávea não será considerada nos modelos desenvolvidos neste trabalho. A estação General Osório é a estação final da Linha 4 e nela ocorre a sua integração com a Linha 1 do sistema metroviário. Como a matriz origem-destino utilizada como referência não dispõe dos dados de embarque na estação General Osório, ela será considerada no modelo como uma estação terminal onde todos os passageiros do

trem devem desembarcar para realizar a integração com a Linha 1. É importante observar que no funcionamento atual do sistema não é necessário o desembarque dos passageiros na estação General Osório para realizar a integração pois o mesmo trem que atende a Linha 4 prossegue diretamente na Linha 1 até a estação Uruguai, sua estação final. Dessa forma, na configuração atual, a frota de trens utilizada no atendimento da Linha 1 e Linha 4 é a mesma. Outra simplificação do modelo é que somente o sentido Jardim Oceânico – General Osório será modelado tendo em vista que este sentido representa o fluxo de maior demanda no período de pico da manhã e representa o gargalo de capacidade do sistema no período.

Para a construção e implementação do modelo computacional de simulação foi utilizado o software Arena versão 14.7 com licença acadêmica. Os modelos desenvolvidos no Arena são baseados na linguagem de simulação SIMAN e são construídos através de blocos de modelagem que, com diferentes funções e configurações, permitem ao usuário criar modelos que representem processos e sistemas reais. O armazenamento de dados e variáveis do modelo permite definir e analisar os comportamentos do sistema.

A construção, validação e implementação do modelo computacional foi dividida em três etapas: inicialmente com a construção e verificação de dois módulos com uma estação inicial (criação de entidades trem e passageiros e procedimentos de embarque) e uma estação final (desembarques); em seguida com a construção e verificação de três módulos, adicionando uma estação intermediária (parada dos trens, desembarques e embarques) conjuntamente à estação inicial e à estação final; e concluindo, a construção e verificação do modelo completo, com as seis estações. Para a verificação do funcionamento dos módulos em cada etapa foram utilizados dados determinísticos simplificados e tabelas de controle para verificar e validar o funcionamento do modelo de acordo com os resultados gerados. O modelo computacional completo está representado na Figura 10.

No modelo computacional desenvolvido são criados paralelamente dois tipos de entidades: passageiro e trem. Na estação inicial da linha são criadas as entidades “trem” em um intervalo de tempo fixo definido pelo operador como o *headway* do sistema seguindo uma distribuição uniforme. Cada entidade trem entra na estação e para na plataforma. Em cada estação os passageiros são criados de acordo com os dados coletados de volume de demanda e distribuição definidos

na seção anterior e são dispostos em fila seguindo a disciplina *First In First Out* (FIFO). A liberação da fila de passageiros para o embarque está sujeita a duas condições: a presença de um trem na respectiva plataforma e a disponibilidade de vagas no respectivo trem. Os passageiros liberados para o embarque são agrupados e o trem só pode deixar a estação depois que todo o grupo de passageiros liberados para embarque se junta ao trem. O trem com passageiros segue então para a estação seguinte - utilizando-se o bloco *Route* do Arena - seguindo os parâmetros de tempo médio de deslocamento entre cada estação. A Figura 11 ilustra o funcionamento da estação inicial do modelo.

Quando o trem com passageiros embarcados entra em uma estação intermediária ocorre a separação entre as entidades trem e passageiros e um tratamento diferenciado é dado para cada tipo de entidade. A entidade trem se dirige para a plataforma da respectiva estação. Os passageiros que estavam embarcados no trem realizam o desembarque em cada estação de acordo com as respectivas porcentagens de desembarque definidas na Tabela 4 seguindo os parâmetros do modelo. Após o desembarque é feita a contagem de passageiros que permanecem ocupando o trem e calculada a capacidade restante do trem. Paralelamente a este processo, uma demanda de passageiros está chegando na estação para realizar o embarque e, a exemplo do que foi descrito na estação inicial, são dispostos em fila com a disciplina FIFO sendo liberados para embarque de acordo com duas condições: a presença do trem na plataforma e a disponibilidade de vagas conforme a capacidade restante no trem. O trem só é liberado da estação depois que o grupo de passageiros liberados para embarque e o grupo de passageiros que permaneceram no trem após o desembarque se juntam à entidade trem. O trem com passageiros segue então para a estação seguinte. A Figura 12 ilustra o funcionamento de uma estação intermediária no modelo.

Ao longo do funcionamento do modelo são registradas medidas estatísticas como a taxa de ocupação média e máxima dos trens em cada estação, o tempo médio e máximo de espera de passageiros em cada estação e o número médio e máximo de pessoas em espera em cada estação. Para construir e realizar as operações descritas no modelo são utilizados os blocos de modelagem do Arena: Create; Assign; Hold; Batch; Separate; Decide; Delay; Record; Route; Station e Dispose. Um resumo com os principais blocos de modelagem, sua aplicação no modelo e parâmetros utilizados estão descritos no Quadro 8.

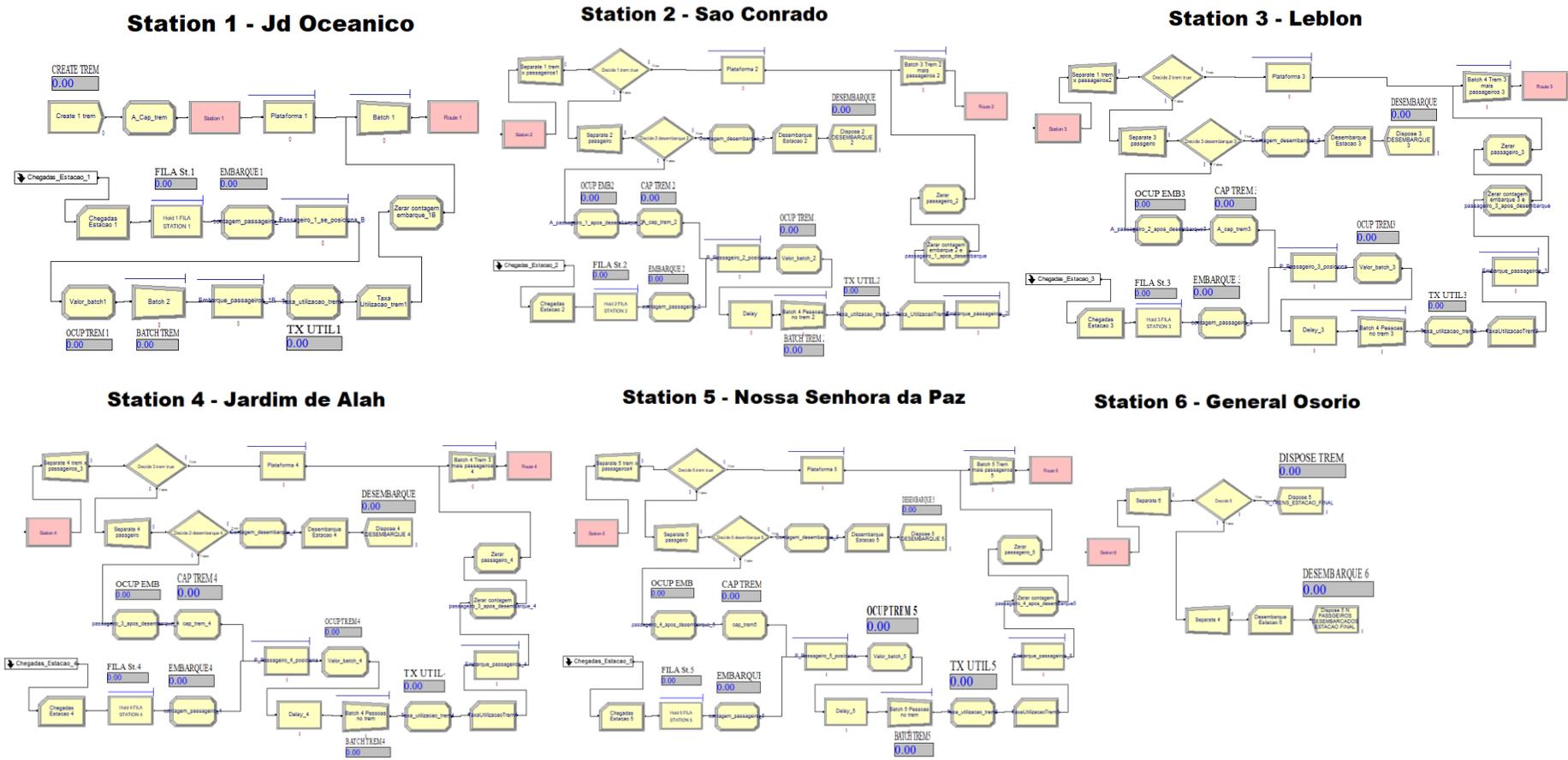


Figura 10 - Modelo computacional de simulação da linha 4 do Metrô. Fonte: Autor 2018.

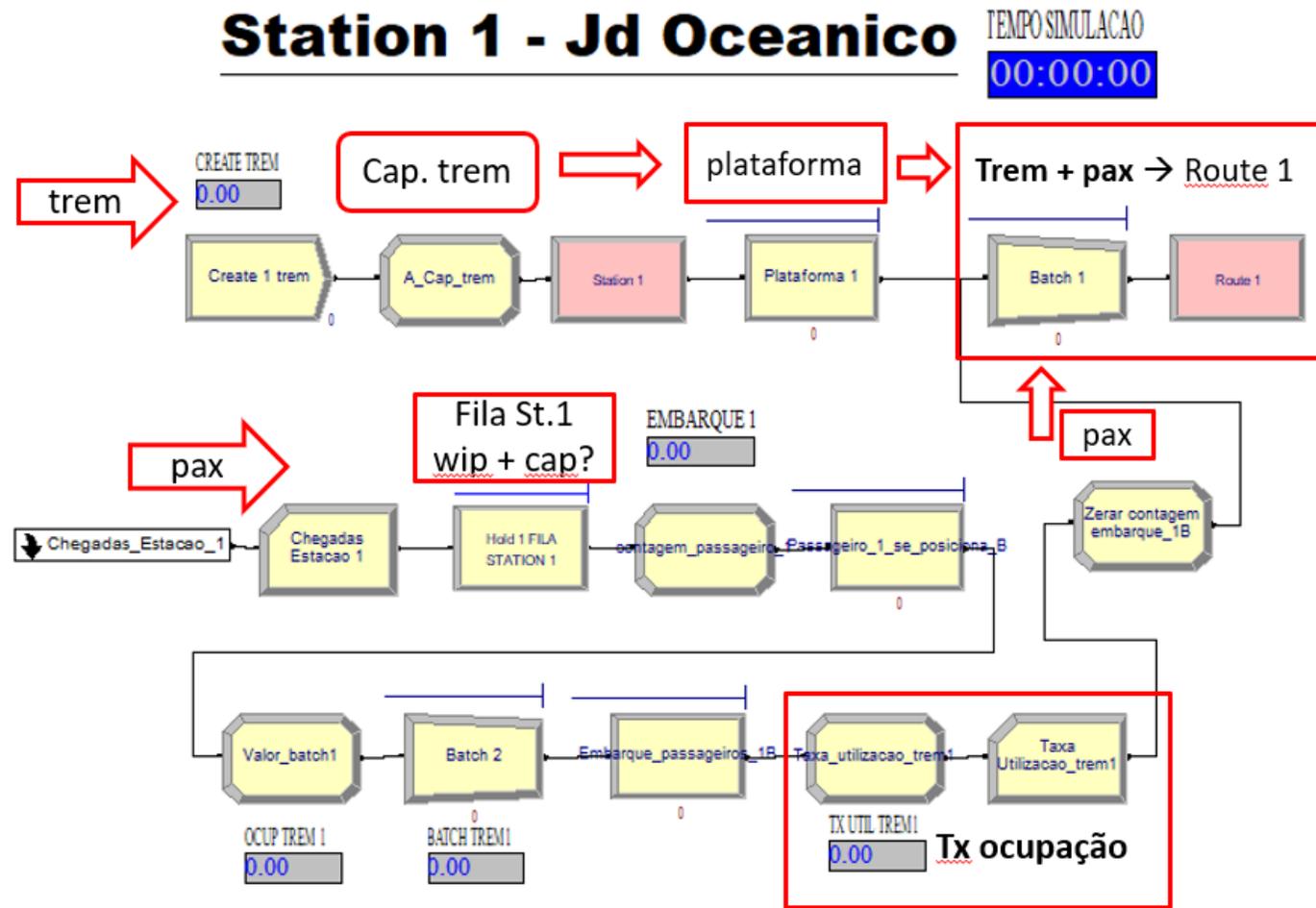


Figura 11 – Funcionamento da primeira estação da linha no modelo computacional. Fonte: Autor 2018.

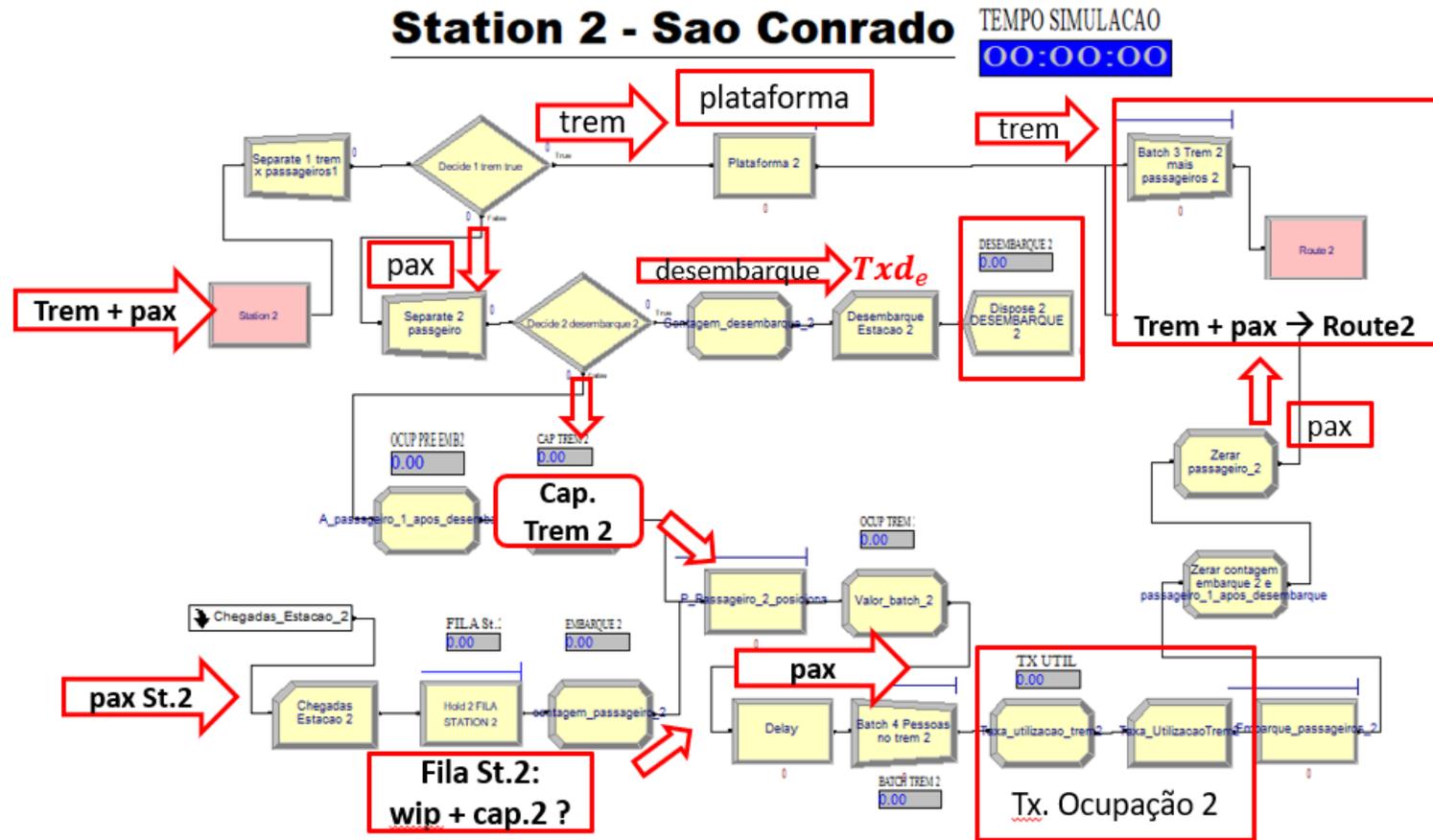


Figura 12 – Funcionamento da estação intermediária no modelo computacional. Fonte: Autor 2018.

Quadro 8 – Resumo dos principais blocos de modelagem, sua aplicação e parâmetros utilizados no modelo.

Blocos de modelagem	Aplicação no modelo	Parâmetros
Create	Criação das entidades do tipo "trem".	Distribuição uniforme do intervalo entre chegadas conforme valor do <i>headway</i> .
	Criação das entidades do tipo "passageiro".	Distribuição exponencial do intervalo entre chegadas de acordo com os dados de demanda em cada estação.
Assign	Atribui à entidade do tipo trem o valor limite de capacidade.	Capacidade de 1800 ou 1200 passageiros por trem.
Hold	Formação de fila de espera dos passageiros em cada estação.	Disciplina da fila: FIFO. Condições para liberar os passageiros da fila: presença do trem na plataforma (função: <i>WIP</i>) e capacidade disponível no trem.
Batch	Agrupar as entidades de passageiros e o grupo de passageiros à entidade trem.	<i>Batch size</i> : agrupa os passageiros de acordo com a quantidade embarcada.
Separate	Separação das entidades de passageiros e trem.	<i>Split existing batch & retain original entity values</i> .
Decide	Define e direciona o número de passageiros para desembarque do trem em cada estação.	<i>Two way by Chance</i> : decide conforme a taxa de desembarque de cada estação.
Station	Define os espaços de cada estação dentro da linha metroviária.	Número da estação na linha.
Route	Encaminha o trem na rota da próxima estação da linha.	<i>Route time</i> : tempo de deslocamento até a próxima estação de acordo com os dados coletados.
Dispose	Realiza o desembarque dos passageiros em cada estação retirando-os do sistema.	Número da estação em que ocorre o desembarque.

4.4. Experimentos e análise dos resultados do modelo de simulação

Nos experimentos computacionais foram realizadas rodadas com variações nos parâmetros de capacidade do trem em 1800 e 1200 pessoas e com variação dos valores do *headway* para investigar os seus efeitos na taxa de ocupação dos

trens, nos tempos de espera na plataforma e no número de pessoas em espera na plataforma. Como o modelo envolve o processo estocástico de chegada de passageiros, para cada configuração de *headway* e capacidade foram rodadas 100 replicações de modo a gerar uma maior qualidade de resultados. Kelton et al (2004) destacam que quanto maior o número de replicações de modelos de simulação estocásticos maior será o grau de confiança dos resultados, no entanto o autor recomenda que no software Arena o número de replicações não ultrapasse o número de 100 replicações devido a uma limitação no software *Crystal Reports* utilizado para apresentação dos resultados. Cada simulação foi rodada considerando o período de 180 minutos, equivalente ao intervalo de pico da manhã especificado no Estudo de Demanda para Linha 4, com um período de aquecimento de 15 minutos para compensar o tempo de ciclo do primeiro trem no sistema conforme os dados operacionais da Tabela 2.

Inicialmente foi realizada a simulação do modelo com a capacidade de 1800 pessoas e o *headway* de 8 minutos, intervalo utilizado no sistema real em outubro de 2016. Os resultados da taxa de utilização e tempo de espera estão descritos na Tabela 5. Nota-se que para esse tempo de *headway* a demanda projetada não é atendida satisfatoriamente, gerando sobrelotação com taxa máxima de ocupação atingindo 100% em quase todas as estações e tempo de espera excessivo atingindo aproximadamente 32 minutos na estação São Conrado. Esse resultado é condizente com fatos noticiados na imprensa em outubro de 2016 indicando que a demanda real da Linha 4 naquele momento estava bem abaixo da demanda esperada, isto é, no modelo de simulação, utilizando uma demanda maior do que a demanda real, o *headway* de 8 minutos não atende com eficiência o sistema.

A coluna *hw* na tabela apresenta o resultado do *half width* (meia largura do intervalo de confiança) com nível de confiança de 95% e é um indicador da precisão e qualidade estatística dos resultados médios gerados nas replicações. Quanto menor a largura do intervalo de confiança com relação ao valor absoluto da estatística maior será a precisão dos resultados. Nota-se que na estatística Taxa de Ocupação o *hw* teve valor 0,00 em todas as estações (considerando o arredondamento até a segunda casa decimal). Nota-se também que o maior *half width* em termos proporcionais foi obtido na estatística de Tempo de Espera na estação Jardim de Alah com um *hw* igual a 0,16 minutos (aproximadamente 3%

se comparado ao valor médio da respectiva estatística que foi de 5,32 minutos). A partir dessa análise pode-se concluir que os resultados obtidos no modelo com a realização de 100 replicações apresentam uma precisão estatística satisfatória.

Tabela 5 - Resultados do modelo de simulação com *headway* de 8 minutos

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	0,9722	0,7320	0,00	8,00	4,00	0,00	1750	666,3	0,57
São Conrado	1,0000	0,9101	0,00	32,00	11,85	0,05	2215	767,7	3,63
Antero de Qental	1,0000	0,8691	0,00	9,00	4,14	0,03	272	73,25	0,44
Jardim de Alah	1,0000	0,8675	0,00	12,00	5,32	0,16	290	61,45	1,76
N. S. da Paz	1,0000	0,8590	0,00	24,00	8,36	0,11	815	208,4	2,84

Os resultados descritos na Tabela 5 mostram que na estação Jardim Oceânico, única estação em que a ocupação do trem não alcançou a sobrelotação, o tempo de espera máximo é limitado pelo tempo de *headway*, o que é facilmente deduzível pelo fato de que taxas máximas de ocupação abaixo de 100% na estação em todo o período significam que sempre haverá disponibilidade para embarque dos passageiros em todos os trens que passarem naquela estação. Nota-se também que o tempo médio de espera nessa estação é a metade do tempo de *headway*.

Foram então realizadas novas rodadas de simulação com a capacidade de 1800 pessoas e variações no tempo de *headway* em 7, 6, 5, 4 e 3 minutos. Os resultados da taxa de ocupação média e máxima estão descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Resultados da taxa de ocupação média e máxima com variação de *headway* entre 7 e 3 minutos e capacidade de 1800 pessoas por trem.

Estação	H = 7 min.		H = 6 min.		H = 5 min.		H = 4 min.		H = 3 min.	
	média	máxima								
Jardim Oceânico	0,6518	0,8811	0,5557	0,8022	0,4606	0,6567	0,3703	0,5494	0,2777	0,4244
São Conrado	0,8244	1,0000	0,7048	0,9956	0,5853	0,8156	0,4721	0,6689	0,3522	0,5194
Antero de Qental	0,7865	1,0000	0,6742	0,9800	0,5695	0,8061	0,4545	0,6528	0,3398	0,5228
Jardim de Alah	0,7852	1,0000	0,6730	0,9567	0,5604	0,8006	0,4487	0,6511	0,3393	0,5217
N. S. da Paz	0,7907	1,0000	0,6783	0,9806	0,5662	0,8206	0,4525	0,6639	0,3396	0,5233

Observando os resultados da Tabela 6 nota-se que com o *headway* de 7 minutos ainda existe superlotação dos trens com taxas de ocupação atingindo 100% na maior parte das estações. Porém, operando com *headway* de 6 minutos o

sistema é atendido sem superlotação, ou seja, o tempo máximo de espera nessa configuração é de 6 minutos e o tempo médio é de aproximadamente 3 minutos como mostra a Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados do modelo de simulação com *headway* de 6 minutos e capacidade do trem de 1800 pessoas.

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	0,8022	0,5557	0,00	6,00	3,01	0,00	1444	507	0,39
São Conrado	0,9956	0,7048	0,00	6,00	3,00	0,00	543	190	0,31
Antero de Quintal	0,9800	0,6742	0,00	6,00	3,03	0,01	201	53,4	0,18
Jardim de Alah	0,9567	0,6730	0,00	6,00	3,00	0,02	133	35	0,16
N. S. da Paz	0,9806	0,6783	0,00	6,00	2,99	0,02	266	69	0,35

Observando os resultados da Tabela 6 é possível notar que a taxa de ocupação média é um indicador importante pois indica uma alta taxa de ociosidade ou subutilização de recursos. Operando com o *headway* de 3 minutos a taxa de ocupação média do sistema fica próxima a 30% e com o *headway* de 4 minutos próxima a 45% indicando um alto grau de subutilização.

Analisando e comparando os resultados anteriores percebe-se que a taxa de ocupação é um indicador importante para avaliação do desempenho do sistema de transporte metroviário e embora o seu aumento possa representar um fator positivo no sentido de que o sistema está tendo alta utilidade, o aumento para níveis acima de cem por cento indica a sobrelotação do sistema, comprometendo o nível de serviço e podendo provocar a fuga de passageiros. Por outro lado, um alto número de viagens com baixa utilização do transporte representa ociosidade do sistema, um indicador negativo, significando custos excessivos para o operador do sistema e desperdício de recursos. Nesse sentido, o tempo de *headway* é um importante fator no balanceamento entre o aumento do nível de serviço - que do ponto de vista dos passageiros está associado com menor tempo de espera e maior conforto - e a diminuição dos custos operacionais - que do ponto de vista do operador do sistema está associada à uma menor utilização da frota de trens, menor consumo de energia e equipes mais enxutas em operação.

Nos períodos de menor demanda o operador do sistema trabalha considerando a densidade máxima dos trens com 4 passageiros por metro quadrado e capacidade máxima de 1200 pessoas por trem. Esse dado foi obtido

diretamente com o operador do sistema na visita técnica realizada. A menor densidade de passageiros por metro quadrado proporciona maior conforto ao usuário e é um fator que promove a melhoria no nível de serviço e tende a tornar o sistema mais atrativo para a população. Nesse sentido, foram realizadas novas rodadas de simulação considerando a capacidade de 1200 pessoas por trem. Os resultados da simulação considerando essa capacidade e *headway* de 6 minutos estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados do modelo de simulação com *headway* de 6 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	1,0000	0,8335	0,00	7,40	3,20	0,01	1513	541	1,35
São Conrado	1,0000	0,9356	0,00	65,40	18,80	0,10	4408	1619	5,31
Antero de Quental	1,0000	0,9037	0,00	12,50	4,60	0,10	356	81	1,79
Jardim de Alah	1,0000	0,9006	0,00	19,00	7,30	0,14	403	87	1,73
N. S. da Paz	1,0000	0,8951	0,00	29,70	9,40	0,10	987	248	2,81

A Tabela 8 mostra que nessa configuração a taxa de ocupação do trem alcançou a superlotação em todas as estações gerando tempos de espera excessivos chegando ao tempo máximo de espera de aproximadamente 65 minutos na estação São Conrado. Foram então realizadas novas rodadas de simulação com a capacidade em 1200 pessoas e variações no tempo de *headway* em 5, 4, 3 e 2,25 minutos. Os resultados da taxa de ocupação média e máxima estão descritos na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da taxa de ocupação média e máxima e variação do *headway* com capacidade de 1200 pessoas por trem

Estação	H = 5 min.		H = 4 min.		H = 3 min.		H = 2,25 min.	
	média	máxima	média	máxima	média	máxima	média	máxima
Jardim Oceânico	0,6908	0,9933	0,5555	0,8242	0,4165	0,6367	0,3136	0,4933
São Conrado	0,8776	1,0000	0,7082	1,0000	0,5283	0,7792	0,3968	0,6158
Antero de Quental	0,8536	1,0000	0,6817	0,9792	0,5097	0,7842	0,3839	0,6025
Jardim de Alah	0,8367	1,0000	0,6731	0,9700	0,5089	0,7825	0,3808	0,5958
N. S. da Paz	0,8374	1,0000	0,6787	0,9958	0,5093	0,7850	0,3823	0,6158

Os resultados da Tabela 9 mostram que com o *headway* de 5 e 4 minutos ainda ocorre a superlotação em estações do sistema com a taxa de ocupação

atingindo 100%. Somente com o *headway* de 3 minutos a taxa de ocupação não atingiu os 100% em nenhuma das estações. Nota-se que nessa última configuração as taxas máximas estão próximas a 80% e as taxas médias em torno de 50%. Realizou-se então uma nova simulação com o *headway* de 3,5 minutos para buscar o aumento da taxa média de ocupação e investigar o desempenho da taxa máxima. Os resultados dessa simulação estão descritos na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados do modelo de simulação com *headway* de 3,5 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	0,6933	0,4884	0,00	3,50	1,75	0,00	832	293	0,25
São Conrado	0,8800	0,6180	0,00	3,50	1,75	0,00	342	110	0,16
Antero de Quintal	0,8625	0,5956	0,00	3,50	1,75	0,01	144	31	0,09
Jardim de Alah	0,8658	0,5890	0,00	3,50	1,76	0,01	94	20	0,08
N. S. da Paz	0,8858	0,5942	0,00	3,50	1,76	0,01	174	40	0,17

Analisando os resultados obtidos com o *headway* de 3,5 minutos em comparação com os resultados do *headway* 3 minutos, nota-se que houve um aumento percentual aproximado de 10% na taxa de utilização média do sistema sem atingir a superlotação do sistema, i. e., houve um melhor aproveitamento dos recursos respeitando o nível de serviço de no máximo 4 passageiros por metro quadrado nos trens estabelecido pelo operador do sistema nessa configuração. Nesse sentido, pode-se afirmar que houve um melhor desempenho do sistema com o *headway* de 3,5 minutos comparado ao cenário com *headway* de 3 ou 4 minutos.

5 Modelo de programação matemática

O presente capítulo apresenta o desenvolvimento de um modelo de otimização com o objetivo de encontrar a exata adequação do valor de *headway* para atender a demanda dinâmica de passageiros de uma linha metroviária. O modelo é construído como um modelo de programação linear inteira mista (MIP) em que a função objetivo é a maximização do *headway* sujeito às restrições de capacidade, tempo de deslocamento do trem e demanda dinâmica dos passageiros. Dessa forma busca-se balancear a maximização do nível de serviço aos passageiros ao garantir todos os embarques sem gerar sobrelotação e a minimização de custos de operação com a maximização do *headway*. O valor do *headway* pode variar dentro de limites mínimos e máximos estabelecidos respectivamente pela capacidade do sistema e pela política de operação. O tempo total é discretizado em subperíodos – por exemplo subperíodos de 30 segundos - e o modelo é capaz de trabalhar com diferentes distribuições que possam ser representadas pelo número de chegadas em cada subperíodo do tempo total.

5.1. Metodologia de modelagem e programação matemática

Problemas de programação linear normalmente referem-se à distribuição eficiente de recursos limitados entre atividades competitivas com a finalidade de atender a um determinado objetivo, por exemplo, maximização de desempenho ou minimização de custos. Em se tratando de programação linear, esse objetivo é expresso por uma função linear (Puccini, 1972). O termo programação linear inteira mista (MIP) refere-se o modelo de programação linear que utiliza em sua formulação variáveis inteiras e contínuas.

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do modelo MIP nesta pesquisa foi adaptado do método proposto por Andrade (2000) compreendendo as etapas: (i) definição do problema para o qual é indicada a procura da melhor solução pela pesquisa dos valores ótimos das variáveis de decisão; (ii)

identificação das variáveis relevantes, incluindo as variáveis de decisão para as quais se procura valores ótimos e variáveis que servem de base para a definição de restrições; (iii) formulação da função objetivo expressando na forma matemática o critério de otimização das variáveis de decisão; (iv) formulação das restrições e das suas relações que devem ser expressas em formas matemáticas; (v) escolha do método matemático de solução apropriado para a solução do modelo; (vi) aplicação do método de solução, que pode ser realizado manualmente ou por computador, sendo importante o conhecimento do algoritmo necessário; (vii) avaliação da solução que deve ser verificada e analisada à luz das expectativas e experiências do engenheiro antes de ser implementada.

O modelo de programação matemática desenvolvido tem o objetivo de encontrar valores ótimos de *headway* para a operação do sistema metroviário da Linha 4. Os parâmetros utilizados no modelo de simulação foram adaptados para aplicação em um modelo de programação matemática e estão detalhados na próxima seção.

5.2. Modelo de programação inteira mista

Nesta seção é apresentada a modelagem matemática desenvolvida, os conjuntos, índices, parâmetros, variáveis, função objetivo e restrições.

Para caracterizar os parâmetros e variáveis do modelo matemático foram definidos os conjuntos e seus respectivos índices. O conjunto de estações E representa as estações que compõem o sistema metroviário a ser modelado. O conjunto de trens K representa o número de viagens de trem na linha metroviária e tem o limite máximo KT - número máximo de viagens de trem no período - calculado pela divisão do tempo total do período a ser otimizado pelo *headway* mínimo do sistema. O *headway* mínimo é limitado pelo tempo de ciclo da linha, tamanho da frota e pelo sistema de sinalização da linha que impõe uma restrição de distância mínima entre os trens. O tempo T é representado por uma discretização do período a ser otimizado em subperíodos menores. Quanto menor o tamanho do subperíodo mais preciso serão os resultados do modelo. Na Tabela 11, verificam-se os conjuntos, índices e seus correspondentes domínios.

Tabela 11 - Conjuntos, índices e seus domínios correspondentes.

Conjuntos	Símbolos	Índices	Domínio
Estação	E	e	$\{1.. E\} \in \mathbb{N}^+$
Viagem-trem	K	k	$\{1.. KT\} \in \mathbb{N}^+$
Tempo	T	t, tt	$\{0..TT\} \in \mathbb{N}$

Os parâmetros de entrada no modelo estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 – Parâmetros do modelo

Parâmetros	Descrição	Unidade
$Tite_e$	Tempo de deslocamento da estação inicial até cada estação da linha	tempo
TT	Duração total do período	tempo
st	Tamanho do subperíodo	tempo
Txd_e	Porcentagem de passageiros ocupantes do trem que desembarcam na estação (e)	%
Cpe_{et}	Quantidade de passageiros que chegam na estação (e) em cada subperíodo de tempo (t)	quantidade / tempo
KT	Número máximo de viagens de trem (k) na linha metroviária no período TT	quantidade
$CapK$	Limite de capacidade de passageiros do trem (k)	quantidade
$Hmin$	Headway mínimo	tempo
$Hmax$	Headway máximo	tempo

A Tabela 13 descreve as variáveis utilizadas no modelo e seus respectivos domínios.

Tabela 13 – Descrição das variáveis do modelo

Variáveis	Descrição	Domínio
H	Variável de decisão que determina o valor do <i>headway</i> ótimo	{Hmin..Hmax} $\in \mathbb{N}$
$ITE_{k e}$	Instante que o trem (k) para na estação (e)	{0...T} $\in \mathbb{N}$
Y_{ket}	Variável binária, define se o trem (k) para na estação (e) no tempo (t) ou não	{0, 1}
USA_k	Variável binária, define se a viagem de trem ‘k’ é realizada ou não	{0, 1}
$CPE_{ACUM_{k e t}}$	Chegada acumulada de passageiros em cada estação(e), a cada parada de trem(k) ao longo do tempo(t)	\mathbb{N}
$EMB_{k e}$	Quantidade de passageiros que embarcam no trem(k) na estação(e)	Q
$OTE_{k e}$	Ocupação de passageiros no trem(k) na estação(e).	Q
$DES_{k e}$	Desembarque de passageiros no trem(k) na estação(e).	Q

A Função Objetivo do modelo é dada pela equação (1) buscando-se maximizar o *headway* sujeito às restrições do sistema.

A modelagem matemática foi elaborada em duas etapas, na primeira foi desenvolvida a modelagem do deslocamento dos trens e paradas nas estações ao longo do tempo de acordo com o valor do *headway*. Na segunda etapa foi desenvolvida a modelagem das restrições de capacidade dos trens e atendimento a demanda. O modelo matemático completo está descrito abaixo.

Função objetivo:

$$\text{Maximize } H \quad (5.1)$$

Sujeito a:

$$Hmin \leq H \leq Hmax \quad (5.2)$$

$$Y_{ket} \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T} \quad (5.3)$$

$$USA_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in \mathbf{K} \quad (5.4)$$

$$\sum_t Y_{ket} = USA_k, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.5)$$

$$USA_k \leq USA_{k-1}, \quad \forall k \in \mathbf{K} \geq 2 \quad (5.6)$$

$$ITE_{ke} = \sum_t t * Y_{ket}, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.7)$$

$$ITE_{ke} \leq Tite_e + H * (ord_k - 1) + M * (1 - USA_k), \\ \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.8)$$

$$ITE_{ke} \geq Tite_e + H * (ord_k - 1) - M * (1 - USA_k), \\ \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.9)$$

$$\sum_k \sum_t Y_{ket} \geq 1, \quad \forall e \in \mathbf{E} = 1, \forall t \in \mathbf{T} | t \geq TT - Tite_{e=E} \quad (5.10)$$

$$CPE_{ACUM_{ket}} = \sum_{tt=0}^{tt=t} Cpe_{et} * Y_{ket}, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E}, \forall t \in \mathbf{T} \quad (5.11)$$

$$EMB_{ke} = \sum_t CPE_{ACUM_{ket}} - \sum_t CPE_{ACUM_{k-1,et}}, \\ \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.12)$$

$$OTE_{k,e=1} = EMB_{k,e=1}, \quad \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \quad (5.13)$$

$$OTE_{ke} = (1 - Txd_e) * OTE_{k,e-1} + EMB_{ke}, \\ \forall k \in \mathbf{K}, \forall e \in \mathbf{E} \geq 2 \quad (5.14)$$

$$OTE_{k_e} \leq CapK, \quad \forall k \in K, \forall e \in E \quad (5.15)$$

$$DES_{k_e} = Txd_e * OTE_{k_{e-1}}, \quad \forall k \in K, \forall e \in E \mid \text{ord}(e) \geq 2 \quad (5.16)$$

$$DES_{k_e}, EMB_{k_e}, OTE_{k_e} \geq 0, \quad \forall k \in K, \forall e \in E \quad (5.17)$$

A inequação (5.2) estabelece os limites mínimos e máximos do *headway*.

A equação (5.3) define a variável binária Y_{ket} que adquire valor 1 caso o trem(k) pare na estação (e) no tempo(t), e 0 caso contrário.

A equação (5.4) define a variável binária USA_k que adquire valor 1 caso a viagem do trem (k) seja realizada e 0 caso contrário.

A equação (5.5) relaciona a variável USA_k com a variável Y_{ket} de parada dos trens.

A inequação (5.6) visa garantir o sequenciamento crescente de realização de viagens dos trens (k) de 1 até KT .

A equação (5.7) é utilizada para capturar o instante ITE_{k_e} em que cada trem(k) realiza parada em cada estação (e) ao longo do tempo (t). Quando a variável Y_{ket} é igual a 1 a variável ITE_{k_e} captura o instante (t) de parada, quando Y_{ket} é igual a 0 a variável ITE_{k_e} assume valor nulo.

As inequações (5.8) e (5.9) são utilizadas para relacionar os instantes de parada ITE_{k_e} dos trens nas estações com o valor da variável H do *headway* e utiliza uma variável *big M* suficientemente grande para que a combinação das inequações resulte em uma função disjuntiva. Quando a variável USA_k é igual a 1, isto é, quando a viagem do trem (k) é realizada, os valores dos limites superiores e inferiores de ITE_{k_e} são iguais e definidos em função do valor H do *headway*. Quando a variável USA_k é nula, os limites inferiores e superiores de ITE_{k_e} tem módulos suficientemente grandes de forma que não representem restrição no sistema. A expressão $\text{ord}(k)$ é uma função do software AIMMs que representa o número da ordem do trem(k), por exemplo: $\text{ord}(k)=3$ representa a terceira viagem de trem no sistema.

A inequação (5.10) é utilizada para garantir que no último ciclo do período tenha-se pelo menos um trem no sistema garantindo que todo o período T seja coberto pelas viagens dos trens.

A equação (5.11) define a variável $CPE_{ACUM_{k e t}}$ como a quantidade acumulada de chegada de passageiros em cada estação (e), a cada parada de trem(k) ao longo do tempo (t).

A equação (5.12) define a variável $EMB_{k e}$ como a quantidade de passageiros que irá embarcar no trem(k) em cada estação (e).

As equações (5.13) e (5.14) definem a variável $OTE_{k e}$ que representa a ocupação do trem (k) na estação (e). Quando se trata da primeira estação do sistema, a ocupação do trem será igual à quantidade de passageiros que embarcam nessa estação. Quando as estações não correspondem à primeira estação da linha a ocupação será igual a ocupação do trem (k) na estação anterior ($e-1$) menos a quantidade de passageiros que desembarcam na estação atual (e), somado à quantidade de passageiros que embarcam na estação atual (e). É importante observar que por sua definição o modelo de otimização garante que o embarque de todos os passageiros acumulados nas estações seja realizado para todo o trem (k) respeitando a capacidade dos trens.

A inequação (5.15) define o limite de capacidade dos trens limitando a variável de ocupação $OTE_{k e}$ pelo valor máximo estabelecido no parâmetro $CapK$.

A equação (5.16) define a variável de desembarque: $DES_{k e}$ para toda estação (e) tal que $ord(e) \geq 2$.

A inequação (5.17) estabelece a não negatividade das variáveis $OTE_{k e}$, $EMB_{k e}$ e $DES_{k e}$.

5.3.

Análise e tratamento dos dados para o modelo de otimização

Os dados e parâmetros coletados sobre o sistema da Linha 4 utilizados no modelo de simulação serão referências para utilização no modelo de otimização, no entanto, para a aplicação no modelo de programação matemática são necessárias algumas adaptações.

No modelo de programação matemática desenvolvido nesse trabalho o tempo é discretizado em subperíodos de 30 segundos. Por isso todos os tempos relacionados ao sistema devem ser aproximados e representados de acordo com a discretização do tempo. O tempo total TT do período de pico da manhã que tem duração de 3 horas – 180 minutos - é representado no modelo matemático como 360 intervalos de 30 segundos no conjunto: $\{0, 1, 2... 360\}$. Os tempos médios de deslocamentos e parada nas estações descritos anteriormente na Tabela 3 foram adaptados no parâmetro $Tite_e$ que representa o tempo de deslocamento da estação inicial ($e=1$) até cada estação (e) conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Tempos de deslocamento adaptados ao parâmetro $Tite_e$

Estações (sentido Jd Oceânico - Gen. Osorio)	$Tite_e$ (min:seg)	$Tite_e$ (aproximado por períodos de 30 seg.)
1- Jardim Oceânico	00:00	0
2 - São Conrado	05:46	12
3- Antero de Quental	09:38	19
4- Jardim de Alah	11:12	22
5- Nossa Senhora da Paz	12:59	26
6- General Osorio	15:06	30

As seis estações da Linha 4 são representadas pela ordem de cada estação na sequência da linha como descrito na Tabela 14.

A chegada de passageiros nas estações ao longo do tempo - que no modelo de simulação é representado por um processo de Poisson - é adaptado no modelo matemático como uma matriz de dimensão 6 por 360 contendo em cada célula o número de chegada de passageiros em cada subperíodo de 30 segundos. As linhas representam as estações e as colunas o tempo discretizado – 6 estações por 360 subperíodos de tempo. Para fazer essa adaptação a demanda prevista para cada intervalo de 10 minutos foi distribuída uniformemente nos subintervalos de 30 segundos. O seu cálculo foi obtido dividindo-se a demanda total de cada intervalo de 10 minutos por 20 – quantidade de segmentos de 30 segundos no intervalo de 10 minutos – obtendo-se a média de chegadas em cada subperíodo. A média foi então arredondada para números inteiros e distribuída na nova matriz de chegadas. A Tabela 15 mostra os valores médios de cada intervalo. A Figura 13 apresenta o gráfico que descreve a matriz com distribuição de chegadas ao longo do tempo.

Tabela 15 - Valores médios de chegada em cada intervalo.

Estação	06:30	06:40	06:50	07:00	07:10	07:20	07:30	07:40	07:50	08:00	08:10	08:20	08:30	08:40	08:50	09:00	09:10	09:20	Total
Jardim Oceânico	41	46	52	64	75	80	77	88	88	96	102	106	103	97	85	86	82	80	28965
São Conrado	19	20	20	22	29	33	34	36	32	33	36	40	40	36	33	27	28	29	10961
Antero de Quental	3	3	4	4	6	7	7	8	8	9	11	12	13	12	11	11	12	12	3027
Jardim de Alah	2	2	3	3	4	5	5	5	5	6	7	8	8	8	7	7	8	8	1994
Nossa Senhora da Paz	3	4	5	6	8	8	8	9	10	12	15	15	17	17	15	14	15	15	3925

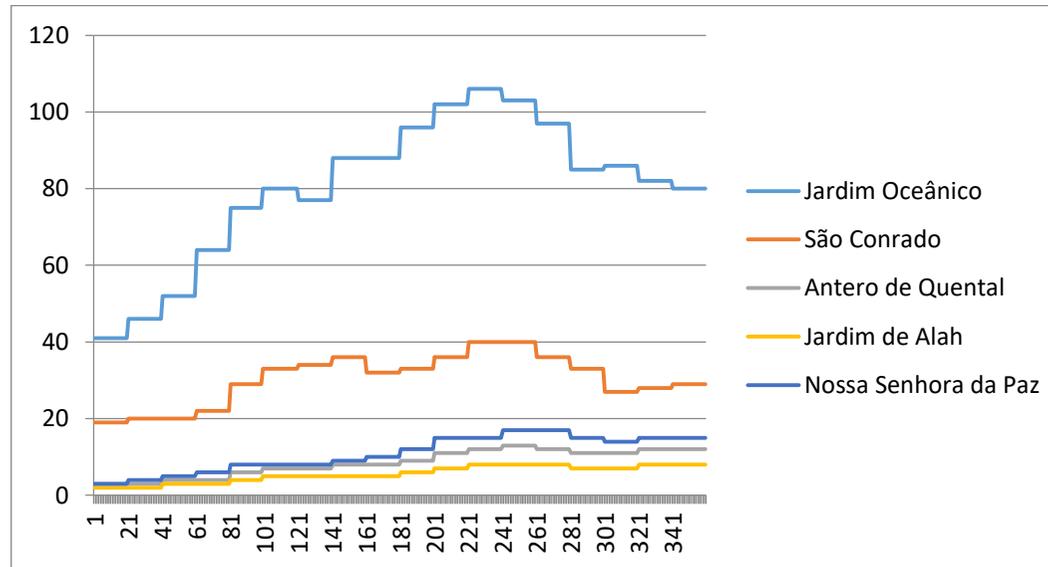


Figura 13 - Gráfico da distribuição de chegadas discretizada em subperíodos de 30 segundos e distribuída uniformemente a cada intervalo de 10 minutos.

5.4. Implementação e validação do modelo

O modelo foi implementado no software comercial de otimização AIMMS versão 3.14 com licença acadêmica.

Para a validação do modelo foram realizados experimentos com dados simplificados do problema considerando um período total de 1 hora em subperíodos de 1 minuto e demanda constante de 10 chegadas de passageiros por minuto. Com os dados simplificados foi possível realizar experimentos com diferentes limites de *headway*, analisar o comportamento do sistema e comparar os resultados obtidos com os resultados esperados. Com os experimentos realizados foi possível validar o funcionamento do modelo.

5.5. Resultados do modelo de programação matemática

Após a validação do modelo foi realizada a sua implementação no AIMMS utilizando os dados operacionais da Linha 4 do metrô e da sua previsão de demanda para o ano de 2016 conforme detalhado na seção 5.2 e 5.3.

O modelo foi solucionado utilizando o solver CPLEX 12,6 e nos cenários testados o tempo de processamento foi menor que um minuto. O modelo foi implementado considerando o limite de capacidade de 1200 passageiros e 1800 passageiros e os seus resultados gerados no AIMMS estão demonstrados respectivamente nas Figuras 14 e 15.

Progress	
READY	
AIMMS	: MetroOptimization.amb
Math.Program	: Maximize_Headway
# Constraints	: 199261
# Variables	: 392042 (390511 integer)
# Nonzeros	: 1531866
Model Type	: MIP
Direction	: maximize
SOLVER	: CPLEX 12.6
Phase	: Postsolving
Iterations	: 1
Nodes	: 0 (Left: 0)
Best LP Bound	: 6 (Gap: 0.00%)
Best Solution	: 6 (Post: 6)
Solving Time	: 20.13 sec (Peak Mem: 443.7 Mb)
Program Status	: Optimal
Solver Status	: Normal completion
Total Time	: 45.63 sec
Memory Used	: 376.4 Mb
Memory Free	: 2061.4 Mb

Figura 14 – Resultado no AIMMS para o modelo considerando a capacidade de 1200 pessoas por trem.

Progress	
READY	
AIMMS	: MetroOptimization.amb
Math.Program	: Maximize_Headway
# Constraints	: 199261
# Variables	: 392042 (390511 integer)
# Nonzeros	: 1531866
Model Type	: MIP
Direction	: maximize
SOLVER	: CPLEX 12.6
Phase	: Postsolving
Iterations	: 271
Nodes	: 0 (Left: 0)
Best LP Bound	: 11 (Gap: 0.00%)
Best Solution	: 11 (Post: 11)
Solving Time	: 31.98 sec (Peak Mem: 614.0 Mb)
Program Status	: Optimal
Solver Status	: Normal completion
Total Time	: 58.48 sec
Memory Used	: 365.4 Mb
Memory Free	: 2309.6 Mb

Figura 15 - Resultado no AIMMS para o modelo considerando a capacidade de 1800 pessoas por trem.

Os resultados do modelo de programação matemática indicam um tempo ótimo de *headway* de 3 minutos para o cenário com capacidade do trem de 1200 pessoas e de 5,5 minutos para o cenário com capacidade de 1800 pessoas. Comparando esses valores com os resultados obtidos no modelo de simulação em

que o maior tempo de *headway* obtido sem sobrelotação do sistema foi de 3,5 minutos para o cenário com capacidade de 1200 e de 6 minutos com capacidade de 1800 pessoas pode-se observar que os valores ficaram muito próximos, com uma diferença de 30 segundos, justamente o intervalo utilizado para discretizar o tempo do período de pico. Uma pequena diferença nos resultados entre os modelos era esperada uma vez que no modelo de simulação os eventos discretos de chegadas ocorrem ao longo do tempo contínuo enquanto que no modelo de programação matemática os eventos ocorrem somente a cada subperíodo e os tempos de deslocamentos no sistema são aproximados. Nesse sentido cabe observar que quanto menor foi o intervalo na discretização do tempo no modelo matemático maior será a precisão dos resultados.

A partir dos resultados obtidos no modelo de otimização foram realizadas novas replicações do modelo de simulação. As tabelas 16 e 17 mostram respectivamente os resultados do modelo de simulação considerando o limite de capacidade de 1200 pessoas e *headway* de 3 minutos e capacidade de 1800 pessoas e *headway* de 5,5 minutos.

Tabela 16 - Resultados do modelo de simulação com *headway* de 3 minutos e capacidade de 1200 pessoas por trem.

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	0,6367	0,4165	0,00	3,0	1,5	0,00	764	252	0,21
São Conrado	0,7792	0,5283	0,00	3,0	1,5	0,00	306	94	0,14
Antero de Quintal	0,7842	0,5097	0,00	3,0	1,51	0,01	119	27	0,07
Jardim de Alah	0,7825	0,5089	0,00	3,0	1,51	0,01	92	17	0,07
N. S. da Paz	0,7850	0,5093	0,00	3,0	1,5	0,01	146	35	0,14

Tabela 17 - Resultados do modelo de simulação com *headway* de 5,5 minutos e capacidade de 1800 pessoas por trem.

Estação	Taxa de ocupação			Tempo de espera (min.)			Pessoas em espera		
	máxima	média	hw	máximo	médio	hw	máximo	médio	hw
Jardim Oceânico	0,7022	0,7022	0,00	5,5	2,74	0,00	1264	459	0,50
São Conrado	0,8944	0,8944	0,00	5,5	2,75	0,00	496	173	0,23
Antero de Quintal	0,8811	0,8811	0,00	5,5	2,75	0,01	196	49	0,17
Jardim de Alah	0,8778	0,8778	0,00	5,5	2,75	0,02	124	32	0,16
N. S. da Paz	0,8983	0,8983	0,00	5,5	2,76	0,02	244	63	0,30

Os resultados obtidos no modelo de simulação são compatíveis com as soluções obtidas no modelo de programação matemática. No cenário com *headway* de 3 minutos a taxa de ocupação máxima dos trens foi de 78,50% na estação Nossa Senhora da Paz e no cenário com *headway* de 5,5 minutos a taxa de ocupação máxima dos trens foi de 89,83% na mesma estação, ou seja, em ambos os cenários a demanda foi atendida sem sobrelotação do sistema com os valores de *headway* maximizados.

É importante observar que com os valores maximizados de *headway* 30 segundos abaixo dos valores obtidos no modelo de simulação, os requisitos do modelo de atendimento da demanda sem sobrelotação são atendidos, resultado que não seria eficaz caso as diferenças entre valores fossem superiores aos resultados do modelo de simulação. O modelo também demonstrou eficiência ao ser solucionado com um tempo de processamento relativamente curto em menos de um minuto. Um outro aspecto importante do modelo de otimização é que a representação da chegada de passageiros em termos de quantidade de chegadas a cada subintervalo de 30 segundos pode ser utilizada para representar diferentes séries ou comportamentos na distribuição de chegadas de passageiros no sistema proporcionando flexibilidade na sua aplicação para diferentes cenários de demanda. A sua representação em matriz é relativamente simples.

A quantidade de viagens de trem em cada cenário gerado pode ser obtida com a divisão do tempo total do período (180 minutos) pelo respectivo tempo de *headway*. A Tabela 18 mostra que quanto maior o tempo de *headway* menor será a quantidade de viagens de trem no período. .

Tabela 18 – Quantidade de viagens de trem no período de 180 minutos de acordo com o tempo de *headway*.

Headway (minutos)	Viagem-trem(k) no período de 180 minutos
6,0	30
5,5	32,7
3,5	51,4
3,0	60

O tamanho da frota necessária para operação em cada cenário é obtido com a divisão do tempo de ciclo da linha pelo respectivo tempo de *headway* e o posterior arredondamento do resultado para o maior número inteiro mais próximo.

O tempo de ciclo de uma linha metroviária é definido pelo tempo que um trem leva para percorrer toda a sua linha em seus dois sentidos, i.e., o tempo de deslocamento do trem desde a partida em uma estação inicial até o seu retorno à mesma estação inicial após percorrer toda a linha. De acordo com os dados descritos na Tabela 2 com os tempos médios de deslocamento da Linha 4 e assumindo que o tempo médio de deslocamento do trem no sentido Jardim Oceânico – General Osório seja o mesmo no sentido contrário, o tempo de ciclo da Linha 4 é de 30,2 minutos. A Tabela 19 mostra o tamanho da frota necessária para operação em cada cenário gerado. É possível observar com os resultados que para o tempo de *headway* de 5,5 e 6,0 minutos é necessária uma frota com o mesmo tamanho de seis trens para operação do sistema. No cenário com *headway* de 3,5 e 3,0 minutos é necessária uma frota de nove e onze trens respectivamente.

Tabela 19 – Tamanho da frota de acordo com o tempo de *headway*.

Headway (minutos)	Tamanho da frota (trens)
6,0	6
5,5	6
3,5	9
3,0	11

A minimização do número de viagens de trem e do tamanho da frota para operação em uma linha metroviária são fatores que contribuem para a diminuição dos seus custos operacionais pois tendem a reduzir o consumo de energia relacionada a quantidade de viagens de trem no sistema e reduzir os custos de equipe, aquisição e manutenção da frota relacionados ao tamanho da frota em operação.

5.6.

Modelo de programação matemática com *headway* variável

Nesta seção será apresentada uma adaptação do modelo de otimização com *headway* fixo para um modelo de otimização com *headway* variável em que os valores de *headway* são maximizados para cada viagem de trem (k) mantendo-se o requisito de atender a demanda de passageiros sem a sobrelotação do sistema. Embora em geral os sistemas metroviários operem com *headway* cíclico, a otimização do sistema com *headway* variável busca encontrar uma escala de

headways que minimize a quantidade de viagens de trem para atendimento da demanda no sistema quando comparada aos resultados do modelo de otimização com *headway* fixo.

Na adaptação do modelo matemático a variável de decisão H_k representa o tempo de *headway* para cada viagem de trem (k) e é feita a substituição da Função Objetivo (5.1) e das inequações (5.8) e (5.9) relacionadas à variável ITE_{ke} e pelas expressões (5.18), (5.19) e (5.20) respectivamente. Nota-se que a relação entre a variável ITE_{ke} e o valor da variável de decisão H_k apresenta uma significativa mudança no novo modelo matemático quando comparada ao modelo com *headway* fixo.

$$\text{Maximize } \sum_k H_k \quad (5.18)$$

$$ITE_{ke} \leq Tite_e + \sum_{kk=1}^{kk=k-1} H_{kk} + H_k + M * (1 - USA_k), \quad (5.19)$$

$$\forall k \in K, \forall e \in E$$

$$ITE_{ke} \geq Tite_e + \sum_{kk=1}^{kk=k-1} H_{kk} + H_k - M * (1 - USA_k), \quad (5.20)$$

$$\forall k \in K, \forall e \in E$$

O modelo foi implementado no software AIMMs e solucionado utilizando o solver CPLEX 12,6 com um tempo de processamento de 6,02 minutos para o cenário com limite capacidade de 1800 passageiros por trem e de 51,4 minutos para o cenário com limite de capacidade de 1200 passageiros por trem. Foi assumido um limite mínimo e máximo de *headway* de 2 minutos e 10 minutos respectivamente em ambos os cenários. A diferença no tempo de processamento nos dois cenários explica-se pelo fato de que no cenário com limite de capacidade de 1200 passageiros por trem é necessários um maior número de viagens de trem (k) para atendimento da demanda o que significa um maior número de iterações do modelo para o encontro da solução ótima. Os resultados das escalas de *headway* para cada cenário estão descritos nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 – Tempos de *headway* para cada viagem de trem (k) no cenário com capacidade de 1800 pessoas por trem.

Capacidade 1800 pessoas por trem											
Viagem-trem(k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Headway (minutos)	-	10	10	10	10	8,5	8,5	8,5	7	7	8
Viagem-trem(k)	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
Headway (minutos)	7,5	7	6	6	6,5	6,5	7	7,5	8	7,5	8

Tabela 21 – Tempos de *headway* para cada viagem de trem (k) no cenário com capacidade de 1200 pessoas por trem.

Capacidade 1200 pessoas por trem																
Viagem-trem(k)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Headway (minutos)	-	10	9,5	8	7,5	6,5	6	5,5	5,5	5,5	5,5	5	5	5	4,5	5
Viagem-trem(k)	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Headway (minutos)	4,5	4,5	4,5	4	4	4	2,5	4	4,5	4,5	4,5	5	5,5	5	5	5

A análise dos resultados das Tabelas 20 e 21 quando comparadas com comportamento da demanda de passageiros descrito no gráfico da Figura 13 mostra que no novo modelo a variação dos tempos de *headway* acompanha a variação da demanda, i.e., nos momentos em que a demanda é menor – por exemplo, no início do período, nas primeiras viagens – o sistema opera com tempos de *headway* maiores, e estes valores diminuem ou aumentam ao longo do período buscando o maior valor de *headway* conforme a variação da demanda.

A Tabela 22 apresenta uma comparação dos resultados da quantidade de viagens de trem (k) e do tempo de processamento para solução entre os modelos de otimização com *headway* fixo e variável para os dois cenários de capacidade de trem.

Tabela 22 – Resultado da quantidade de viagens de trem (k) e tempo de processamento para os modelos de otimização com *headway* fixo e variável.

Modelo de otimização e cenário de capacidade do trem	Quantidade de viagens de trem no período de 180 minutos	Tempo de processamento no AIMMs (minutos)
Headway fixo de 5,5 minutos (cap. 1800 passageiros/trem)	32,7	0,76
Headway variável (cap. 1800 passageiros/trem)	22	6,02
Headway fixo de 3 minutos (cap. 1200 passageiros/trem)	60	0,97
Headway variável (cap. 1200 passageiros/trem)	32	55,03

Analisando os resultados da Tabela 22 pode-se observar que no modelo de otimização com *headway* variável foi possível reduzir significativamente a quantidade de viagens de trem para atendimento da demanda no período quando comparado ao modelo com *headway* fixo. No cenário com limite de capacidade de 1800 passageiros por trem houve uma redução de 32,7 para 22 viagens (redução aproximada de 32,7%) e no cenário com limite de capacidade de 1200 passageiros por trem houve uma redução de 60 para 32 viagens (redução aproximada de 46,7%). Os resultados mostram também que o tempo de processamento computacional para solução do modelo de otimização com *headway* variável é significativamente maior do que o modelo com *headway* fixo, atingindo o tempo de 6,02 minutos no cenário com limite de capacidade de 1800 passageiros por trem e 55,03 minutos no cenário com limite de capacidade de 1200 passageiros por trem.

6

Conclusões e considerações finais

Nessa dissertação foram desenvolvidos um modelo de simulação de eventos discretos e um modelo de programação matemática aplicados na análise do sistema metroviário da Linha 4 do Rio de Janeiro para a obtenção de valores ótimos de *headway* de acordo com a previsão de demanda de passageiros. Os modelos foram validados e implementados e os resultados indicam que a estrutura da Linha 4 tem capacidade para atender com eficiência a demanda prevista no Estudo de Demanda para a Linha 4 no período de pico da manhã de 2016. No cenário considerando limite de capacidade de 1200 pessoas por trem, o modelo de otimização e os experimentos no modelo de simulação indicaram um tempo ótimo de *headway* de 3 minutos e 3,5 minutos respectivamente. No cenário considerando o limite de capacidade de 1800 pessoas por trem, o modelo de otimização e os experimentos no modelo de simulação indicaram um tempo ótimo de *headway* de 5,5 minutos e 6 minutos respectivamente.

Foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre os estudos envolvendo modelos de simulação e de otimização aplicados em sistemas metroviários identificando alguns diferenciais dos modelos desenvolvidos neste trabalho. O modelo de otimização desenvolvido apresenta uma abordagem diferenciada ao buscar a exata adequação do valor de *headway* para atender a uma demanda dinâmica de passageiros de forma que o sistema seja capaz de garantir todos os embarques de passageiros ao longo do tempo sem gerar sobrelotação dos trens e respeitando a sua capacidade. O modelo foi construído como um modelo de programação linear inteira mista e sua solução por método exato garante a otimalidade dos resultados enquanto a maioria dos estudos da literatura formulam modelos não lineares e são solucionados por algoritmos metaheurísticos que não garantem a sua otimalidade.

Um diferencial relacionado ao modelo de simulação desenvolvido está nos experimentos realizados utilizando diferentes valores de *headway* e capacidade

dos trens que permitiu avaliar o comportamento e desempenho do sistema utilizando as medidas de taxa de ocupação média e máxima dos trens em cada estação, tempo médio e máximo de espera em cada estação e número médio e máximo de pessoas em espera em cada estação. Destacou-se a utilização das estatísticas de taxa de ocupação média e máxima dos trens para avaliar o desempenho e fazer o balanceamento entre nível de serviço e custos no sistema.

O modelo de programação matemática para sistemas metroviários que operam com *headway* cíclico demonstrou eficiência ao ser solucionado com tempo de processamento menor que um minuto e relativa simplicidade de operação de forma que pode ser aplicado em decisões de curto prazo para obtenção de indicadores ótimos de *headway* para atender uma determinada previsão de demanda. Foi realizada uma adaptação do modelo de otimização considerando a operação do sistema metroviário com *headway* variável e obtendo-se como resultados escalas de *headway* que minimizaram significativamente a quantidade de viagens de trem para atendimento da demanda em cada cenário. Nesse caso os tempos de processamento computacional para a solução aumentaram para aproximadamente 6 minutos, no cenário com limite de capacidade de 1800 passageiros por trem, e 55 minutos no cenário com limite de capacidade de 1200 passageiros por trem. O modelo de simulação exige maior complexidade para implementação e pode ser aplicado no nível tático ou estratégico para avaliar a capacidade e comportamento do sistema a partir de previsões de demanda de médio e longo prazo e no planejamento para eventos que envolvam um grande incremento na demanda como grandes torneios esportivos, festivais de música ou festas de fim de ano.

Uma limitação do trabalho está na restrição de informações relacionadas à distribuição da demanda a cada intervalo de 10 minutos e não em intervalos menores que forneceriam maior precisão na sua distribuição. No modelo de programação matemática o tamanho dos intervalos na discretização do tempo se mostrou um fator determinante na precisão dos resultados. Outra limitação está relacionada aos dados de previsão de demanda que se limitam ao período de pico da manhã e somente à Linha 4 levando à simplificação do modelo desenvolvido. Dados de demanda que compreendessem um dia completo de operação em todo o sistema metroviário, para além do pico da manhã, seriam importantes para analisar o desempenho do sistema metroviário do Rio de Janeiro de forma global.

Nesse sentido é importante observar que no funcionamento atual do sistema a integração da Linha 4 com a Linha 1 é realizada de forma direta, sem necessidade de desembarque na estação General Osório, o que difere do modelo desenvolvido que assume a estação General Osório como estação terminal onde é realizado o desembarque de todos os passageiros.

Como trabalhos futuros sugere-se incluir no modelo de simulação a estocasticidade dos tempos de deslocamento e parada dos trens nas plataformas na Linha 4 para avaliar os seus efeitos no desempenho do sistema. Sugere-se também a coleta de novos dados da Linha 4 relativos à capacidade das plataformas e incluí-las como restrições no modelo de simulação para limitar a quantidade de pessoas em espera nas plataformas em cada estação. A restrição de capacidade da plataforma combinada com o tempo de evacuação de passageiros na saída da plataforma pode ser utilizada para modelar o limite de pessoas que desembarcam em cada estação ao longo do tempo. Ainda no modelo de simulação sugere-se configurar a apresentação dos resultados estatísticos do modelo em uma variável-matriz de forma a avaliar o comportamento de seus resultados de forma dinâmica ao longo do tempo de simulação do sistema.

Com relação ao modelo de otimização sugere-se para trabalhos futuros o desenvolvimento de um modelo estocástico que considere a incerteza na distribuição da demanda e a utilização de intervalos menores na discretização do tempo a fim de aumentar a precisão dos resultados. Sugere-se também a aplicação no modelo de simulação dos resultados obtidos no modelo de otimização com *headway* variável para sua validação e análise.

Os modelos de simulação e de otimização podem ser adaptados para aplicação em outras configurações de sistemas metroviários a partir da atualização de seus parâmetros. Espera-se que os modelos desenvolvidos possam ser utilizados como referências para novas aplicações em outros sistemas metroviários.

7

Referências bibliográficas

ANDRADE, E. L. D. **Introdução à Pesquisa Operacional**. 2ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2000.

BALLIS A., LIBERIS K., MOSCHOVOU T. **Investigating the capacity of a Metro line by means of a simulation model**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, Vol. 218, 2004.

BRASIL. Lei n. 12.537 de 3 de janeiro de 2012. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. **Câmara dos Deputados**. Disponível em < <http://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/2012/lei-12587-3-janeiro-2012-612248-norma-pl.html>>. Acesso em: 19 de abril de 2018.

BRONSON, R. **Pesquisa Operacional: 200 Problemas resolvidos, 180 problemas propostos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1985.

COORDENAÇÃO DE APERFEIÇOAMENTO DE PESSOAL DE NÍVEL SUPERIOR. Classificação da Produção Intelectual. Disponível em: < <http://www.capes.gov.br/avaliacao/instrumentos-de-apoio/classificacao-da-producao-intelectual>>. Acesso em: 05 de fevereiro de 2018.

CARVALHO, C. H. R. **Desafios da Mobilidade Urbana no Brasil**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, IPEA, Brasília, 2016.

Chao-Ming H., Pei-Pei C., Mao Z., Meng-Zi C., Lei L. **Study on Optimization Model of Subway Train Operation Based on the Forecast of Passenger Flow**. Information Technology Journal, 12 (22), 2013.

CHWIF, L. E A.C. MEDINA (2014) **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações**. (4ª ed.) Elsevier Brasil, São Paulo, 2014.

CONCESSIONÁRIA RIO BARRA S.A. Boletins informativos das obras do Metrô Linha 4. Disponível em < <http://www.metrolinha4.com.br>>. Acessado em 20/10/2016.

DING X., YANG X., HU H., LIU Z., PAN H. **The Optimization of Passengers' Travel Time under Express-Slow Mode Based on Suburban Line** Mathematical Problems in Engineering, 2016.

DUMBEK F., CELEBI D. **A Simulation Model For Light Rail Transportation System**. Proceedings of the International Conference on Modeling and Applied Simulation, MAS, 2009.

FGV. Relatório Final - **Estudos de Demanda**: Linha 4 do Metrô do Rio de Janeiro. Fundação Getúlio Vargas, FGV Projetos, 2011.

GRUBE, P; NUNEZ, F; CIPRIANO, A. **An event-driven simulator for multi-line metro systems and its application to Santiago de Chile metropolitan rail network**. Simulation Modelling Practice and Theory 19, 393–405, 2011.

HALIM, H. I.; SAKR, M. A. E W. M. ALY. **Metro Timetable Optimization from Passenger Perspective Based on Simulation Models And Incomplete Data of Passenger Flow**. IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI), Athens, Greece, 2016.

HASSANNAYEBI, E; SAJEDINEJAD, A; MARDANI, S. **Urban rail transit planning using a two-stage simulation-based optimization approach**. Simulation Modelling Practice and Theory, 49, 151–166, 2014.

HUTCHINSON, B. G. **Princípios de Planejamento dos Sistemas de Transporte Urbano**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1979.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P. E D. A. SADOWSKI. **Simulation with ARENA**. WCB/McGraw-Hill, New York, USA, 2004.

LIEBCHEN, CHRISTIAN. **The First Optimized Railway Timetable in Practice**. Transportation Science 42(4):420-435, 2008.

NUNEZ, F; REYES, F; GRUBE, P; CIPRIANO, A. **Simulation Railway and Metropolitan Rail Networks: From Planning to On-Line Control**. IEEE Intelligent Transportation Systems, 2010.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de metodologia científica: projetos de pesquisas, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses**. 2 ed. São Paulo : Pioneira, 1999. 320 p.

PHILLIPS, Dom T., RAVINDRAN, A., SOLBERG, JAMES J. **Operations Research: Principles and Practice**. New York: John Wiley & Sons, 1976.

PORTUGAL, Licinio da Silva (Org.). **Transporte, Mobilidade e Desenvolvimento Urbano**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

PUCCINI, A. DE L., **Introdução a Programação Linear**. 1a ed. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S.A, 1972.

REYES F., CIPRIANO A. **Passenger Estimation using Moving Horizon Optimization**. 15th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization, The International Federation of Automatic Control. 2012.

RIBEIRO, S. K. (Org.). **Transporte Sustentável: alternativas para ônibus urbanos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

SAHELGOZIN M., ALIMOHAMMADI A. **Modelling Temporal Schedule Of Urban Trains Using Agent-Based Simulation And Nsga2-Based**

Multiobjective Optimization Approaches. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W5, 2015.

SCHMARANZER, D.; BRAUNE, R. E K. F. DOERNER. **A Discrete Event Simulation Model of the Viennese Subway System for Decision Support and Strategic Planning.** Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference, p. 2406-2417, 2016.

SETRANS. Plano Diretor de Transportes Urbanos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro 2015 (PDTU-RMRJ). Secretaria de Estado de Transportes, Governo do Estado do Rio de Janeiro, 2015.

SHAHI, M., MEHDIPOUR E., AMIRI, M. **Optimization using simulation and response surface methodology with an application on subway train scheduling.** International Transactions In Operational Research 23, 797 – 811, 2016.

SHANG P., LI R., YANG L. **Optimization of Urban Single-Line Metro Timetable for Total Passenger Travel Time under Dynamic Passenger Demand.** Procedia Engineering, 137, 151 – 160, 2016.

SMTR. Plano de Mobilidade Urbana Sustentável da cidade Rio de Janeiro (PMUS). Secretaria Municipal de Transportes, Prefeitura do Rio de Janeiro, 2015.

STOILOVA, S. E V. STOEV. **Methodology of Transport Scheme Selection for Metro Trains Using a Combined Simulation-Optimization Model.** Promet – Traffic & Transportation, v. 29, n. 1, p. 23-33, 2017.

SUN, X., LU H., DONG H., XUN J. **Timetable multi-objective optimization by improved genetic algorithm based on stochastic passenger flow.** IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Proceedings, ITSC, 2016.

SUN, X.; ZHANG, S.; DONG, H.; CHEN, Y. E H. ZHU. **Optimization of Metro Train Schedules With a Dwell Time Model Using the Lagrangian Duality Theory.** IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, v. 16, n. 3, p. 1285-1293, 2015.

THOMÉ, A., SCAVARDA L. F., SCAVARDA, A. J. **Conducting systematic literature review in operations management.** Production Planning & Control, 27:5, 408-420, 2016.

VÁZQUEZ-ABAD F.J., ZUBIETA L. **Ghost Simulation Model for the Optimization of an Urban Subway System.** Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications, 15, 207–235, 2005.

VERGARA, A. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 1 ed. São Paulo: Atlas, 1997. 90p.

XU X., LI K., LI X. **A multi-objective subway timetable optimization approach with minimum passenger time and energy consumption.** Journal of Advanced Transportation, 50:69–95, 2016.

YALÇINKAYA O., MIRAC BAYHAN G. **Modelling and optimization of average travel time for a metro line by simulation and response surface methodology.** European Journal of Operational Research 196, 225–233, 2009.

YANG X., NING B., LI X., TANG T. **A Two-Objective Timetable Optimization Model in Subway Systems.** IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 15, No. 5, Outubro, 2014.

YANG, XIN; CHEN, ANTHONY; NING, BIN; TANG, TAO. **Bi-objective programming approach for solving the metro timetable optimization problem with dwell time uncertainty.** Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review, 2017.

YOU, J.; GUO, W.; ZHANG, Y. E J. HU. **An Effective Simulation Model for Multi-line Metro Systems Based on Origin-destination Data.** IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), Rio de Janeiro, Brazil, November 1-4, 2016.