

DANIEL MARQUES GOMES DE MORAIS

**Um modelo computacional para a simulação de
sistemas de transporte urbano**

São Paulo

2014

DANIEL MARQUES GOMES DE MORAIS

**Um modelo computacional para a simulação de
sistemas de transporte urbano**

Dissertação apresentada à Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências pelo Programa de Pós-graduação em Sistemas de Informação.

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 10 de setembro de 2014. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da EACH-USP e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP (BDTD), de acordo com a Resolução CoPGr 6018, de 13 de outubro de 2011.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Antonio Digiam-
pietri

São Paulo

2014

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

CATALOGAÇÃO-NA-PUBLICAÇÃO

Biblioteca

Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo

Morais, Daniel Marques Gomes de

Um modelo computacional para a simulação de sistemas de transporte urbano / Daniel Marques Gomes de Moraes ; orientador, Luciano Antonio Digiampietri. – São Paulo, 2014

125 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação, Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo

Versão corrigida

1. Transporte urbano – Simulação computacional. 2. Sistemas de transporte. 3. Computação aplicada. I. Digiampietri, Luciano Antonio, orient. II. Título.

CDD 22.ed. – 388.40285

Folha de Aprovação

Dissertação de Mestrado sob o título “*Um modelo computacional para a simulação de sistemas de transporte urbano*”, defendida por Daniel Marques Gomes de Moraes e aprovada em 10 de setembro de 2014, em São Paulo, Estado de São Paulo, pela comissão julgadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. Luciano Antonio Digiampietri
Presidente
Escola de Artes, Ciências e Humanidades -
Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Andre Riyuiti Hirakawa
Escola Politécnica - Universidade de São
Paulo

Prof. Dr. Sarajane Marques Peres
Escola de Artes, Ciências e Humanidades -
Universidade de São Paulo

Aos meus pais, que pavimentaram a estrada para que chegasse até aqui, e a Heloisa, que tanto me incentivou a atravessá-la.

Agradeço aos meus pais, Damasio e Esmeralda, por sempre terem me mostrado o valor do conhecimento, e por terem me incentivado a chegar até aqui.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Antonio Digiampietri, por ter me guiado durante todo o trajeto durante este trabalho, e sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos funcionários da biblioteca do Metrô de São Paulo, por serem tão prestativos e pela grande ajuda na obtenção de informações utilizadas neste trabalho.

Agradeço também aos professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Informação, por sua grande contribuição a minha formação.

À minha esposa, Heloisa, que antes trilhou o mesmo caminho e durante todo este trajeto me ajudou, com seus conselhos e puxões de orelha quando, por alguma razão, me via disperso. E, por estar ao meu lado nesta jornada.

Por fim, agradeço também a todos aqueles que, de alguma forma contribuíram para este trabalho e não foram citados aqui nominalmente.

“It’s a dangerous business, Frodo, going out of your door” he used to say. “You step into the Road, and if you don’t keep your feet, there is no knowing where you might be swept off to.”

(Bilbo Baggins - J.R.R Tolkien - Lord of the Rings)

Resumo

MORAIS, Daniel Marques Gomes de. **Um modelo computacional para a simulação de sistemas de transporte urbano**. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Atualmente as dificuldades enfrentadas no deslocamento urbano são consideradas um dos maiores problemas, especialmente nas grandes cidades. O planejamento adequado do sistema de transporte urbano é fundamental para minimizar o tempo e os custos de deslocamento, melhorando a qualidade de vida da população e o próprio funcionamento do ambiente urbano. Esta dissertação parte da premissa de que os sistemas de simulação podem ser usados para estudar diferentes alternativas para melhorar o sistema de transportes, servindo de base para a tomada de decisão de forma a otimizar o deslocamento urbano. Assim, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação do sistema de transporte urbano. O modelo proposto combina características dos modelos mesoscópicos e microscópicos, incluindo o comportamento dos usuários no planejamento da rota. Um framework para o desenvolvimento de aplicações de simulação é descrito e testado com uma implementação usando como cenário o Metropolitano de São Paulo (Metrô), considerando-se dados da pesquisa Origem-Destino para teste e validação do modelo aqui proposto.

Palavras-chave: Sistema de transporte. Simulação. Transporte urbano. Processo de decisão do usuário.

Abstract

MORAIS, Daniel Marques Gomes de. **A computational model for urban transportation system simulation**. 2014. 125 p. Dissertation (Master of Science) – School of Arts, Sciences and Humanities, University of São Paulo, São Paulo, 2014.

Nowadays, the difficulties faced in urban displacement are considered a major problem, especially in big cities. Proper urban transport system planning is essential to minimize travel time and costs, improving quality of life and improving the urban environment. This master thesis starts from the premise that simulation systems can be used to study different alternatives to improve the transport system, so that decision making can be better justified and can optimize the urban displacement. Therefore, this work presents the development of a computational model for urban transportation system simulation. The model proposed targets mesoscopic and microscopic models, including user behaviors of route planning. A framework for development of simulation applications is described, with an implementation using as scenario the Metropolitan of São Paulo (Metrô) for model testing, considering data from Origem-Destino survey for testing and validation of the model here proposed.

Keywords: Transportation system. Simulation. Urban transportation system. User's decision process.

Lista de Figuras

Figura 1	Principais componentes de um sistema de transporte urbano e seus relacionamentos.	23
Figura 2	Uma visão simplificada da relação de causa-efeito entre fatores atuantes em um sistema de transporte urbano.	26
Figura 3	Diagrama representando uma simulação macroscópica.	27
Figura 4	Diagrama representando o processo de desaceleração de veículos em múltiplas faixas em uma simulação microscópica.	28
Figura 5	Artigos por tipo de simulação	36
Figura 6	Artigos por objetivo da simulação e artigos por meio previsto	36
Figura 7	Distribuição dos artigos por estratégia utilizada no processo de decisão do usuário	44
Figura 8	Distribuição dos artigos por estratégia utilizada no processo de decisão	51
Figura 9	Representação esquemática de linhas e conexões do Metrô de São Paulo	53
Figura 10	Representação simplificada do grafo referente ao Metrô de São Paulo - Trechos das linhas Azul, Vermelha e Amarela e suas conexões	61

Figura 11	Diagrama de classes do modelo	63
Figura 12	Diagrama de classes da implementação	77
Figura 13	Representação simplificada da estruturação de ambos os segmento de uma linha como células	79
Figura 14	Criação de instâncias de <i>Station</i> para a Linha 4 - Amarela	84
Figura 15	Gráfico - Cenário 1: Usuários Inseridos por Ciclo	94
Figura 16	Gráfico - Cenário 1: Evolução do tempo médio de espera na estação ..	96
Figura 17	Gráfico - Cenário 1: Passageiros em conexões por ciclo	97
Figura 18	Gráfico - Cenário 2: Evolução do tempo médio de espera na estação ..	99
Figura 19	Gráfico - Cenário 2: Passageiros em conexões por ciclo	100
Figura 20	Gráfico - Cenário 2: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção	101
Figura 21	Gráfico - Cenário 3: Passageiros em conexões por ciclo	102
Figura 22	Gráfico - Cenário 3: Distribuição de usuários - Rota modificada durante o trajeto	103
Figura 23	Gráfico - Cenário 3: Evolução do tempo médio de espera na estação ..	104

Figura 24	Gráfico - Cenário 4: Distribuição de usuários - Rota modificada durante o trajeto	105
Figura 25	Gráfico - Cenário 4: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção	106
Figura 26	Gráfico - Cenário 4: Evolução do tempo médio de espera na estação ..	107
Figura 27	Gráfico - Cenário 4: Passageiros em conexões por ciclo	108
Figura 28	Gráfico - Cenário 5: Passageiros em conexões por ciclo	109
Figura 29	Gráfico - Cenário 6: Passageiros em conexões por ciclo	112
Figura 30	Gráfico - Cenário 6: Passageiros em conexões por ciclo - Higienópolis, Barra Funda e São Joaquim	112
Figura 31	Tempo médio de deslocamento no período e cenários estudados	114

Lista de Tabelas

Tabela 1	Comparação entre aspectos dos modelos <i>Substantive Rationality</i> e <i>Muddling Through</i>	31
Tabela 2	Distância entre estações da linha 1 - Azul	54
Tabela 3	Distância entre estações da linha 3 - Vermelha	55
Tabela 4	Distância entre estações da linha 2 - Verde	56
Tabela 5	Distância entre estações da linha 4 - Amarela	57
Tabela 6	Passageiros entrantes na simulação e passageiros entrantes no cenário real	86
Tabela 7	Trens operando em horário de pico	87
Tabela 8	Células entre estações da linha 1 - Azul	88
Tabela 9	Células entre estações da linha 3 - Vermelha	89
Tabela 10	Células entre estações da linha 2 - Verde	89
Tabela 11	Células entre estações da linha 4 - Amarela	90

Tabela 12	Capacidade dos trens por frota	90
Tabela 13	Passageiros por trem (média das frotas)	90
Tabela 14	Parâmetros por linha utilizados na simulação	91
Tabela 15	Cenário 1: Entradas no sistema na Pesquisa Origem - Destino e na Simulação	95
Tabela 16	Cenário 6: Configuração simplificada da linha 6 - Laranja	110
Tabela 17	Cenário 6: Configuração da linha 4 - Amarela com a inclusão da estação Higienópolis	110
Tabela 18	Cenário 6: Parâmetros utilizados para a linha 6 - Laranja	111

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Motivação	17
1.2	Objetivos	18
1.3	Metodologia	18
1.4	Organização da Dissertação	20
2	Conceitos Fundamentais	22
2.1	Fundamentos de Sistemas de Transporte Urbano	22
2.2	Modelos de simulação de meios de transporte	26
2.3	Qual meio de transporte escolher? O processo de decisão do usuário	29
2.4	Considerações Finais	32
3	Levantamento Bibliográfico	33
3.1	Simulação de sistemas de transporte usando múltiplos meios	33
3.1.1	Método de Revisão	33
3.1.2	Condução da Revisão	35
3.2	O Processo de decisão do usuário	41
3.2.1	Método de Revisão	42
3.2.2	Condução da Revisão	43
3.3	Considerações Finais	51
4	Desenvolvimento	52
4.1	Apresentação do Cenário - O Metrô de São Paulo	52

4.1.1	As linhas do Metropolitano de São Paulo	53
4.1.2	Conceituando o Metrô de São Paulo - Aspectos do Sistema	57
4.2	O Framework	58
4.2.1	Fundamentação do Modelo	59
4.2.2	O framework	62
4.2.3	O funcionamento e utilização do <i>framework</i>	70
4.2.4	Estendendo o Framework	71
4.2.5	O Usuário	73
4.3	A Simulação - Modelagem e Implementação	75
4.3.1	A Linha	75
4.4	Considerações Finais	82
5	Avaliação do Modelo e Resultados	83
5.1	Configuração da simulação - O Metrô de São Paulo	83
5.1.1	A Pesquisa Origem-Destino	84
5.1.2	Tratamento dos Usuários na Pesquisa Origem - Destino	85
5.1.3	Configuração da Simulação	87
5.2	Testes e Validação	92
5.2.1	Cenário 1: Simulação Básica	93
5.2.2	Cenário 2: Simulação com Intervenções	98
5.2.3	Cenário 3: Simulação com Comportamento de Usuário Agressivo	101
5.2.4	Cenário 4: Simulação Completa	103
5.2.5	Cenário 5: Simulação Completa com Comportamento Estático	107
5.2.6	Cenário 6: Simulação com Inclusão de Nova Linha	110
5.2.7	Considerações sobre os Resultados	113
6	Conclusões	115

6.1	Principais Contribuições	116
6.2	Trabalhos Futuros	118
6.3	Considerações Finais	119
	Referências	121

1 Introdução

Com o aumento na população de grandes cidades e, por conseguinte, o aumento da quantidade de deslocamentos de pessoas, é necessário o planejamento adequado do sistema de transporte urbano, visando a minimizar o tempo de deslocamento, melhorando a qualidade de vida da população e o próprio funcionamento do ambiente urbano.

A ineficiência do sistema de transporte público, provocada pelo aumento da demanda, má distribuição dos fluxos e pelo aumento da procura pelo transporte individual, este causado inclusive pela ineficiência do transporte público, amplia a saturação do sistema, aumentando o tempo de viagem do usuário, levando a deslocamentos, que em condições ideais demorariam poucos minutos, a demorar horas. Deslocamentos esses feitos em condições estressantes, seja pelo transporte público superlotado, seja pelos imensos congestionamentos encontrados nas vias de tráfego.

Sendo assim, é importante que as autoridades responsáveis pelo planejamento de sistemas de transportes possuam ferramentas adequadas para esta tarefa, proporcionando a maior fluidez possível para o sistema em todas as condições, aumentando a qualidade de vida da população e eficiência econômica da cidade.

Este trabalho apresenta um modelo computacional para a simulação de múltiplos sistemas de transporte urbano e a implementação da simulação utilizando esse modelo para sistemas de transporte sobre trilhos, considerando o Metropolitano de São Paulo como cenário, um sistema de transporte sobre trilhos com múltiplas linhas e conexões para transferência entre elas. Ainda, este trabalho trata do processo de decisão do usuário, utilizando diferentes perfis comportamentais para a definição da rota a ser adotada dentro do sistema de transporte de forma a alcançar a seu destino.

O objetivo é que tal modelo permita o desenvolvimento de sistemas nos quais o planejador possa identificar a situação de um determinado sistema de transporte, simular alterações e identificar os efeitos que elas terão neste cenário, permitindo a identificação de planos de ação e fundamentando as decisões tomadas para a melhoria do sistema de transporte em questão.

1.1 Motivação

A motivação geral deste trabalho surge da observação diária dos grandes problemas enfrentados no deslocamento urbano, especialmente nas grandes cidades, e da premissa que sistemas de simulação podem ser utilizados para o estudo de diferentes alternativas de aperfeiçoamento do sistema de transporte, a fim de que as tomadas de decisão sejam melhor fundamentadas e possam otimizar este deslocamento.

A motivação específica advém da revisão sistemática realizada, a qual apresenta trabalhos sobre simulação de sistemas de transporte voltadas para múltiplos meios. Nesta revisão, é possível observar a massiva presença de trabalhos voltados para a simulação da dinâmica entre veículos (normalmente automóveis) e mais algum outro meio (em geral, pedestres), em um dado cenário. Dos trabalhos analisados, poucos visavam cenários mais amplos (como a dinâmica de fluxos de usuários no sistema de transporte de uma cidade) restringindo-se a cenários restritos, como cruzamentos.

Tendo em vista o impacto direto e indireto que o deslocamento de usuários em um sistema de transporte causa, evidenciado principalmente pelos efeitos de suas decisões, como ir a um determinado destino usando transporte público ou automóvel, se torna clara a necessidade do estudo destes fluxos de maneira combinada entre seus diversos modais, conforme evidenciado no trabalho de Rodrigue, Comtois e Slack (2007).

Sendo assim, este trabalho preenche uma parte da lacuna identificada, propondo um modelo computacional para o desenvolvimento de aplicações para a simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos meios. Tal modelo permite o desenvolvimento de aplicações envolvendo cada um destes meios, com suas respectivas particularidades, a interconexão entre os mesmos, e sua dinâmica de seu funcionamento, como o fluxo de usuários com suas respectivas necessidades e comportamentos.

Ainda, são implementados, como forma de estudo do referido modelo, a simulação de um sistema de transporte já conhecido, o Metropolitano de São Paulo, um sistema de transporte sobre trilhos com múltiplas linhas e conexões entre elas. Tal escolha se dá tanto pelos problemas enfrentados atualmente por tal sistema, como por haver uma quantidade considerável de dados sobre os fluxos de usuários neste sistema. O usuário, por sua vez, tem sua implementação feita considerando seus aspectos comportamentais em relação ao tempo de deslocamento e sua predisposição a escolher caminhos alternativos.

1.2 Objetivos

Visto o anteriormente exposto, este trabalho possui os seguintes objetivos:

- Descrever um modelo de construção de aplicações para a simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos meios.
- Propor um modelo para o tratamento do comportamento do usuário no cenário proposto.
- Construir um *framework* para a implementação do modelo proposto e uma aplicação utilizando este modelo a partir de um sistema de transporte já conhecido, sendo ele o Metropolitano de São Paulo.

1.3 Metodologia

Há uma extensa bibliografia acerca de modelagem de sistemas de transportes. Desta forma, foi feita uma revisão sobre os principais conceitos teóricos relacionados ao tema, com o objetivo de prover uma familiarização com o assunto e fornecer o ferramental básico para o prosseguimento deste trabalho. Os temas tratados são: a fundamentação sobre o estudo de sistemas de transporte, a simulação de sistemas de transporte e a modelagem do processo de decisão do usuário.

A partir de tal fundamentação, foram construídas duas revisões sistemáticas, com o objetivo de trazer as principais técnicas e o estado da arte em dois tópicos: a simulação de sistemas de transporte utilizando múltiplos modos¹, e o processo de decisão do usuário na escolha de caminhos em sistemas de transporte.

Concluído o levantamento teórico, foi feito o desenvolvimento do modelo computacional propriamente dito. O desenvolvimento ocorreu em duas etapas paralelas, o desenvolvimento da simulação de um sistema de transporte sobre trilhos e o desenvolvimento de um modelo (e um *framework*) para permitir a implementação de outros modos de transporte e a comunicação entre eles.

A escolha por sistemas de transporte sobre trilhos foi feita para validar o modelo proposto, uma vez que o Metropolitano de São Paulo possui um grande volume de

¹Neste contexto, um determinado meio de transporte usado para o deslocamento. Por exemplo, o metropolitano de São Paulo é um modo, assim como ônibus também é um modo, ou mesmo se deslocar a pé pode ser categorizado como um modo.

informações sobre o fluxo de usuários. Estas informações são coletadas através da pesquisa Origem e Destino (COORDENADORIA DE PESQUISA E AVALIAÇÃO DE TRANSPORTE, 2007), uma pesquisa periódica feita com usuários do sistema. Tais informações, somadas às mudanças na rede e projetos de expansão previstos ligando pontos importantes da rede (o acréscimo da Linha 4 - Amarela e o projeto da Linha 6 - Laranja), mostraram-se um bom cenário para tal objetivo.

A Pesquisa Origem e Destino é composta, essencialmente, por informações sobre as zonas da região metropolitana de São Paulo, usuários que dela se originam e o destino por eles informados. Estes dados são tratados e disponibilizados de forma a indicar, em uma determinada faixa de tempo, quantos usuários vão para onde dentro do sistema. Cabe ressaltar que não há nessa pesquisa informações sobre o caminho feito pelo usuário dentro da rede, então caberá ao nosso modelo encontrar tal resposta.

O modelo foi feito em uma etapa conceitual, com a construção dos componentes sendo feita sob a luz dos trabalhos de Barceló (2010) e a modularização por ele apresentada, e conceitos de geografia do transporte urbano abordados por Rodrigue, Comtois e Slack (2007), ambos discutidos em maiores detalhes na fundamentação teórica deste trabalho.

Por sua vez, a implementação do *framework* ocorreu de forma concorrente à implementação da simulação do sistema de transporte sobre trilhos, de forma iterativa, partindo do funcionamento básico de uma linha (o deslocamento de trens em uma linha, sentido de ida e volta) e a inclusão de paradas em estações, a coleta e liberação de usuários nas estações, evoluindo então para a conexão com outras linhas e implementação do usuário de forma simples (apenas seu deslocamento dentro do sistema, ainda sem processo de decisão).

Em sequência, foi feita a implementação da inteligência do usuário, sob a perspectiva da escolha do caminho no sistema de transporte. Nesta implementação foram definidos perfis comportamentais, que influenciarão diretamente na escolha do caminho. Tais perfis visam a refletir a predisposição de um usuário a tentar outro caminho quando ocorrem interferências em seu caminho habitual.

Concluída a implementação, foi feita a validação do modelo. Para tal, foram utilizados os dados conhecidos para a configuração e execução do modelo e então, foram criados diversos cenários, considerando uma determinada janela de tempo. A partir de tais cenários foi feita a análise dos resultados obtidos em relação aos comportamentos esperados, utilizando para tal, por exemplo, gráficos indicando a concentração e fluxo

de usuários em regiões críticas do sistema. Foram utilizados os dados do cenário atual (incluindo a linha Amarela) e da pesquisa Origem-Destino. Ainda, foi criado um novo cenário, a partir de um trecho da linha Laranja, em projeto, para verificar os efeitos de uma nova linha no sistema atual.

Vale ressaltar que neste trabalho, apesar de ser apresentada uma sugestão sobre a forma como os dados serão disponibilizados pela simulação, cabe ao implementador do modelo o desenvolvimento desta funcionalidade, uma vez que está diretamente relacionada à utilização que será feita e ao sistema de transporte estudado.

1.4 Organização da Dissertação

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos, considerando também esta introdução. Os capítulos seguintes estão assim organizados:

- O Capítulo 2 contém um resumo dos principais conceitos teóricos sobre modelagem e simulação de sistemas de transporte, assim como a fundamentação teórica sobre o processo de decisão de usuários de tais sistemas com relação ao caminho a ser seguido. Ainda, é feita uma breve apresentação sobre os principais conceitos que norteiam e organizam sistematicamente o estudo de sistemas de transporte e seus fluxos.
- O Capítulo 3 apresenta a revisão da literatura acerca do assunto, dividida em duas seções. A primeira, versa sobre a simulação de sistemas de transporte utilizando múltiplos meios, sendo usada para a definição da problemática tratada neste trabalho. A segunda, por sua vez, discute o processo de decisão do usuário sob a perspectiva dos modelos apresentados no capítulo 2.
- O Capítulo 4 descreve a implementação do modelo proposto neste trabalho, assim como a sua efetiva utilização aplicada a um cenário conhecido. São apresentadas as decisões de modelagem tomadas durante o desenvolvimento, sob a ótica da reutilização e conexão com outros modelos.
- O Capítulo 5 discute o modelo, apresentando observações sobre as simulações realizadas a partir do cenário proposto, considerando as informações disponíveis sobre o mesmo.

- Por fim, no Capítulo 6, são apresentadas as considerações finais sobre este trabalho, nas quais são expostas as contribuições feitas, assim como evoluções, melhorias possíveis e trabalhos futuros sobre o modelo proposto.

2 *Conceitos Fundamentais*

Neste capítulo são descritos os principais conceitos teóricos considerados para o desenvolvimento deste trabalho, de forma a fundamentar o modelo proposto. São abordados três assuntos neste capítulo, divididos em três seções. Na primeira, são apresentados os principais conceitos relativos a sistemas de transporte. A segunda, por sua vez, trata dos principais conceitos e métodos para a modelagem da simulação de sistemas de transporte. Na terceira seção, são discutidos aspectos acerca do processo de decisão do usuário sobre sistemas de transporte. Por fim, são apresentadas as considerações finais acerca dos conceitos apresentados neste capítulo.

A primeira seção foi construída com base nos trabalhos de Barceló (2010) e Rodrigue, Comtois e Slack (2007). A segunda, aborda o trabalho de Barceló (2010), no qual provê uma interessante discussão acerca do tópico, além de conceituar um *framework* para a modelagem e construção de sistemas de simulação. Por fim, a terceira seção parte do discutido no trabalho de Órtuzar (2011) e também em aspectos relevantes apontados por Rodrigue, Comtois e Slack (2007).

2.1 Fundamentos de Sistemas de Transporte Urbano

Segundo Barceló (2010), um sistema é “um conjunto de entidades que agem e interagem através da realização de algum fim lógico”. Ainda, segundo Rodrigue, Comtois e Slack (2007), sistemas de transporte são “compostos por um complexo conjunto de relacionamentos entre demanda, as localizações as quais servem e as redes que suportam tais movimentações”. Podemos entender que um sistema de transporte é um conjunto de componentes relacionados, somados a um conjunto de locais, as formas pelas quais eles são alcançados e a necessidade de deslocamento entre estes locais.

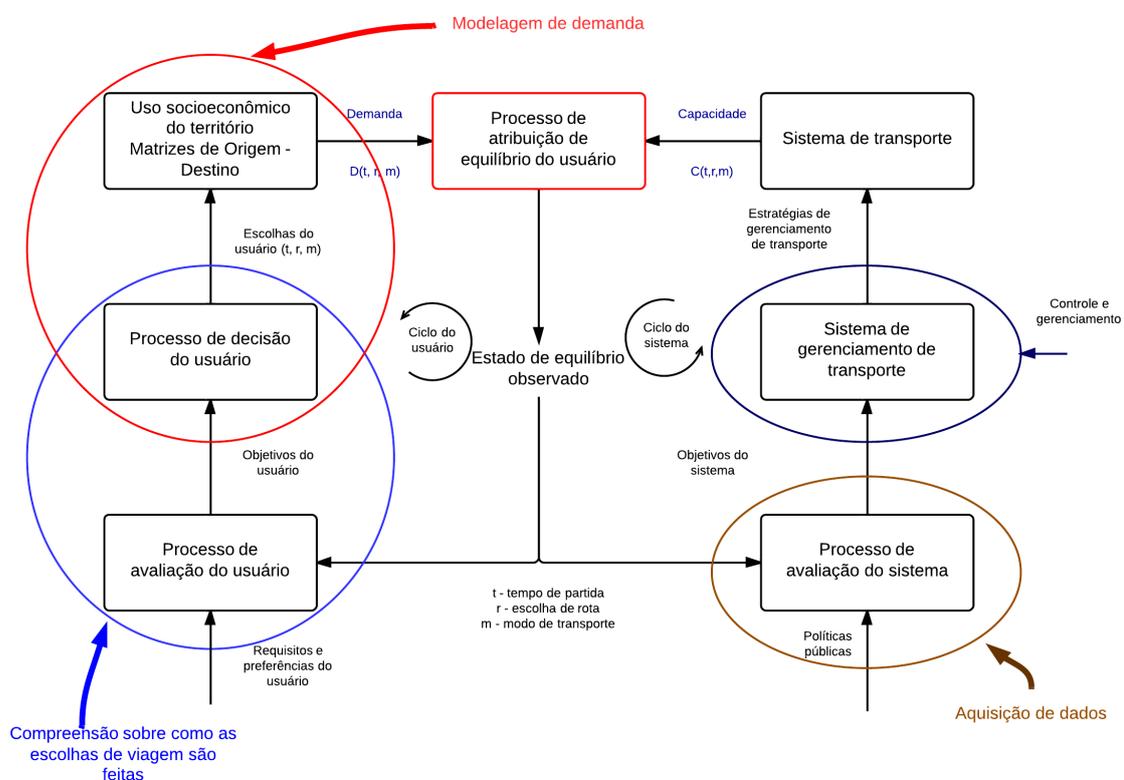
Ampliando o conceito, sistemas de transporte urbano podem ser compreendidos como sistemas cujo o foco “é o passageiro, uma vez que as cidades são vistas como locais da maior interação humana, sendo representados pela combinação de um intrincado tráfego de comutação, atividades comerciais e atividades culturais e de lazer” (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2007).

Desta forma, é possível entender um sistema de transporte como um sistema

no qual temos dois principais componentes dinâmicos: o sistema em si e o usuário. O primeiro pode ser definido como a combinação entre meios de deslocamento oferecidos e sua complementaridade, subsídios e políticas públicas, e, até mesmo, a distribuição das funções socioeconômicas regionais em um determinado cenário. Já o segundo trata das combinações entre necessidades e preferências relativas à utilização do sistema de transporte, ou seja, o usuário tem requisitos bem determinados quando faz uso do sistema de transporte como, por exemplo, o conhecimento sobre sua origem e destino e tempo desejado para deslocamento. Além disso, o usuário também possui critérios subjetivos, como conforto, relação entre custo e benefício ¹ entre os meios. Na figura 1 é apresentado um esquema sumarizando os principais componentes de um sistema de transporte urbano e como eles se relacionam.

Figura 1 – Principais componentes de um sistema de transporte urbano e seus relacionamentos.

Fonte: Tradução de (BARCELÓ, 2010)



Assim, um sistema de transporte é composto pelos seguintes elementos:

¹Usado aqui no sentido subjetivo, de percepção do usuário acerca do meio de transporte em questão.

- Processo de Avaliação do Usuário: A definição dos requisitos e preferências dos usuários do sistema, por exemplo, tolerância a lotação, relação entre renda e custo do deslocamento, entre outras variáveis que deverão ser levadas em conta ao tomar uma decisão sobre a escolha do caminho a ser tomado dentro do sistema.
- Processo de Decisão do Usuário: Como o usuário toma decisões sobre qual caminho a ser seguido, ou seja, como ele relaciona as informações apontadas no item anterior com o cenário em que se encontra e seus objetivos.
- Matriz de Uso Socioeconômico do Território: Indica a utilização e os principais fluxos dentro do sistema. Quantos usuários vão para onde e qual o motivo deste deslocamento (por exemplo, trabalho, lazer ou residência).
- Processo de Definição do Sistema: Conjunto de dados sobre o sistema de transporte, como por exemplo, tarifas, horários e rotas definidas;
- Sistema de Gerenciamento de Transporte: O controle do sistema de transporte em questão. Chegadas, partidas, capacidade atendida (por exemplo, o aumento ou redução do número de ônibus em uma determinada linha).
- Sistema de Transporte: O sistema de transporte em si. Quais são as formas de deslocamento possíveis e como chegar nelas. Qual sua capacidade de atendimento da demanda.

Todos estes itens convergem em um “ponto de equilíbrio”, ou seja, a situação onde dado um determinado cenário ele permanece com o mínimo de alterações possíveis até que haja algum fator que perturbe a situação (uma mudança no preço dos combustíveis, por exemplo).

Sistemicamente, um sistema de transporte urbano pode ser construído utilizando dois principais elementos estruturais (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2007):

- Nós: Representam polos de atividades urbanas, relacionadas a atividades econômicas ou mesmo a acessibilidade pelo sistema de transporte. Terminais, como estações de trens, terminais de ônibus e aeroportos são importantes nós, onde podem se concentrar diversas atividades econômicas e sociais fundamentais para o funcionamento da cidade. Os nós possuem graus de hierarquia relacionados a sua função urbana e seu papel socioeconômico para a cidade.

- **Ligações:** Representam infraestruturas que possibilitam os fluxos entre os nós. São exemplos de ligações, as ruas e avenidas de uma cidade e o trecho de deslocamento entre estações de trens. Também podem ser classificadas hierarquicamente de acordo com sua importância para o fluxo de usuários dentro do sistema.

Ainda, Rodrigue, Comtois e Slack (2007) classificam o transporte urbano em três categorias:

- **Transporte coletivo:** Aquele que provê mobilidade pública e acessível para determinados pontos da cidade. Sua eficiência está fundamentada no transporte de grande número de pessoas, a partir da obtenção de economia de escala. Como exemplos, temos trens, ônibus, balsas e metrô.
- **Transporte individual:** Aquele que a mobilidade vem de uma decisão do usuário. Como exemplo, temos automóveis, bicicletas, ou mesmo o caminhar.
- **Transporte de mercadorias:** É caracterizado pelos deslocamentos de produtos em um centro urbano. Caminhões de transporte de mercadorias e entregas são exemplos desta categoria.

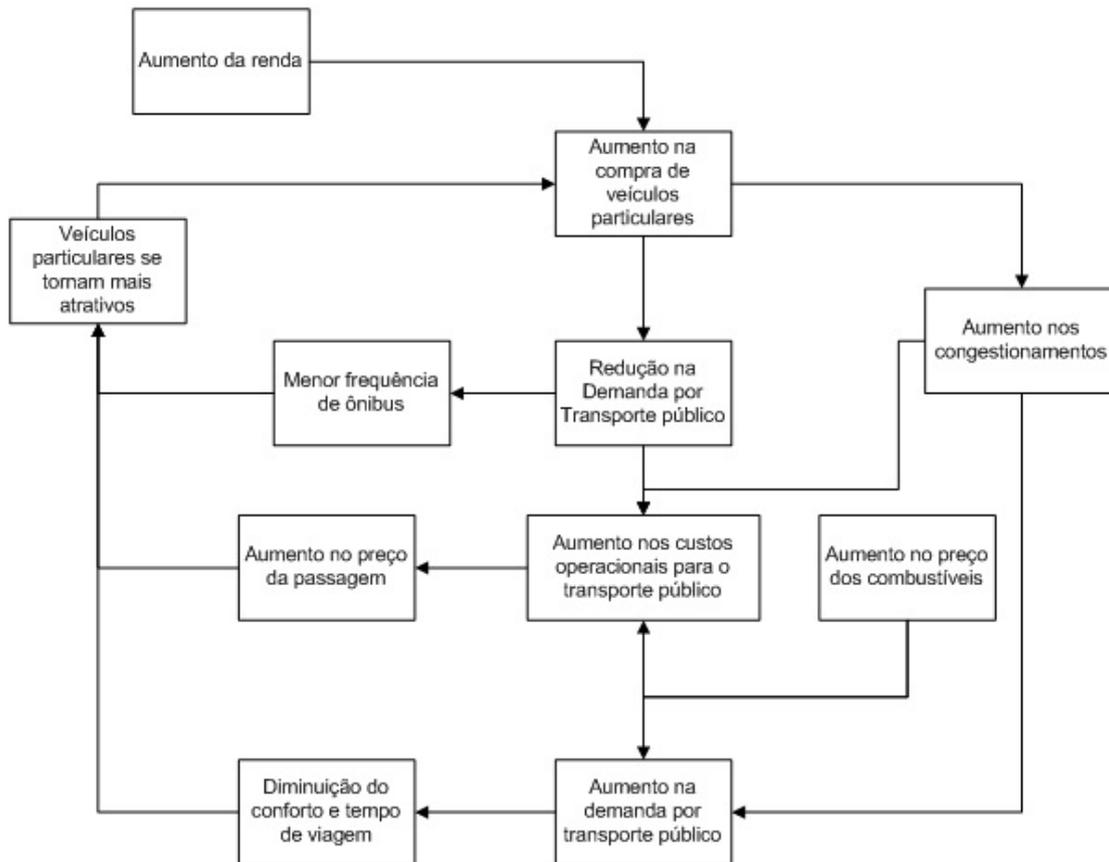
De acordo com Órtuzar (2011), o objetivo de um sistema de transporte “é atender uma determinada demanda” para o deslocamento de “pessoas ou mercadorias com diferentes propósitos, em diferentes tempos” observadas as capacidades operacionais do sistema. Ainda, a tarefa de planejamento de um sistema de transporte envolve “encontrar o equilíbrio entre” as demandas do sistema e o equilíbrio do nível de serviço deste sistema através do tempo e espaço de forma a “maximizar o bem estar social”.

A natureza da problemática do planejamento de sistemas de transporte urbano envolve lidar com uma série de situações de causa-efeito, que impactam diretamente nas decisões e funcionamentos dos componentes anteriormente expostos. A figura 2 apresenta uma representação de relações de causa-efeito típicas em um sistema de transporte, envolvendo transporte público e transporte individual.

Nota-se a presença de fatores não diretamente associados com o funcionamento do sistema. Por exemplo, o aumento na renda pode provocar um aumento na compra de veículos pela população, o que pode representar uma redução na demanda por transporte coletivo e um aumento significativo de uso nas vias para transporte individual, o que acaba, por sua vez, causando maiores congestionamentos, reduzindo a atratividade do

Figura 2 – Uma visão simplificada da relação de causa-efeito entre fatores atuantes em um sistema de transporte urbano.

Fonte: Adaptado de (ÓRTUZAR, 2011)



meio. Ainda, um aumento no preço dos combustíveis também pode afetar diretamente a dinâmica do sistema, aumentando a demanda por transporte coletivo, em detrimento ao transporte individual.

2.2 Modelos de simulação de meios de transporte

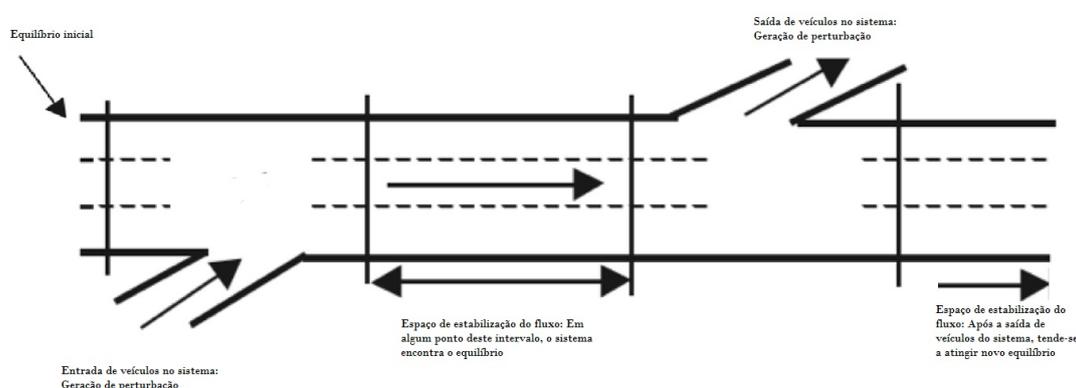
A base para a simulação de um determinado meio de transporte consiste na modelagem de seu tráfego no ambiente. Sendo assim, Barceló (2010) aponta a possibilidade de simulação em três tipos diferentes: macroscópica, microscópica e mesoscópica.

A modelagem macroscópica é baseada na “teoria do fluxo de tráfego contínuo, cujo objetivo é a descrição da evolução no espaço e no tempo de variáveis que caracterizam

fluxos macroscópicos: volume, velocidade e densidade” (BARCELÓ, 2010). Esta modelagem deriva da abordagem utilizada em simulações de hidrodinâmica e tem por princípio fundamental que, dados dois pontos em uma determinada via, sem entradas ou saídas, o número de veículos se mantém. Com isso, a inserção ou remoção de itens no modelo é feita com base em pontos de vazão, por exemplo, entradas ou saídas de uma rodovia, as quais causam distúrbios na massa principal (figura 3).

Figura 3 – Diagrama representando uma simulação macroscópica.

Fonte: Adaptado de (BARCELÓ, 2010)

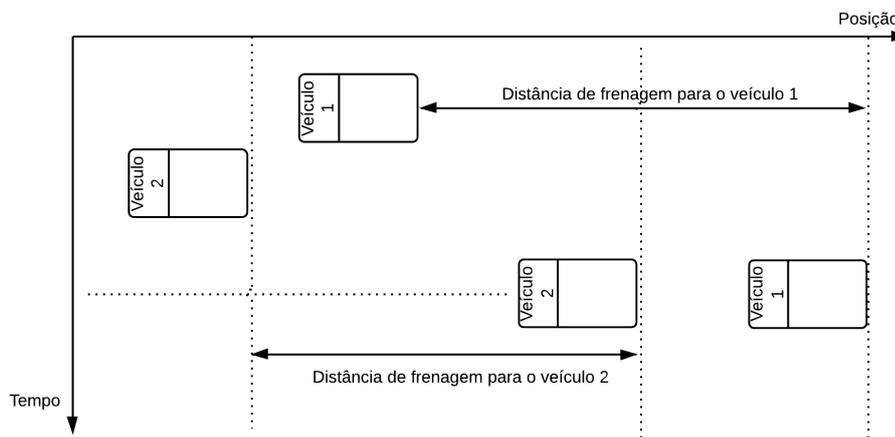


Já a modelagem microscópica é “baseada na descrição do movimento de cada veículo individual que compõe o fluxo de tráfego” (BARCELÓ, 2010). Assim sendo, o modelo prevê o comportamento de cada um dos componentes em relação ao ambiente em que está inserido e, também, aos outros componentes do modelo. Em outras palavras, considerando uma rodovia com múltiplas faixas de rolagem, o modelo deverá levar em conta o comportamento de um veículo com relação a estas faixas, assim como todos os outros veículos que o cercam, com um conjunto de comportamentos acionados em resposta a determinadas situações. São eles: aceleração, desaceleração, ultrapassagens, mudanças de faixa, direcionamento para saídas, situações de riscos (um veículo adiante para repentinamente), entre outros (figura 4). Tais variáveis e comportamentos, naturalmente, tomam como base a situação e comportamento o qual deseja-se que o modelo simule.

Destaca-se neste tipo de modelagem, a identificação dos comportamentos de veículos em relação aos demais, em especial os quais procuram descrever como um determinado veículo se comporta seguindo outro. Tais modelos começaram a surgir na literatura por volta das décadas de 1950 e 1960, nos trabalhos de Reuschel (1950) e Pipes (1953). Tal tipo de modelagem é conhecida pelo termo *car-following*.

Figura 4 – Diagrama representando o processo de desaceleração de veículos em múltiplas faixas em uma simulação microscópica.

Fonte: Adaptado de (BARCELÓ, 2010)



Neste modelo, procura-se responder duas principais questões: qual é a natureza do comportamento do motorista; e qual a sua reação a determinados estímulos e como eles podem ser mensurados. Considerando a forma mais simples desta relação, podemos observar o seguinte cenário: suponha que um determinado veículo está na mesma faixa de rolagem atrás de outro veículo. O veículo a frente acelera, então, qual a reação do veículo anterior? E no caso de uma desaceleração, como o veículo deverá se comportar? Ainda, caso a desaceleração seja brusca, qual a reação do motorista de forma a evitar a colisão? Pode-se ainda ampliar o cenário, considerando múltiplas faixas de rolagem, acostamentos, diferentes tipos de veículos e, a partir disto, uma vez determinados os comportamentos individuais, incluí-los no mesmo ambiente, de forma a visualizar a relação de causa-efeito entre todos estes componentes seguindo um conjunto de regras.

Por fim, a modelagem mesoscópica consiste “na simplificação a qual - enquanto captura os pontos essenciais da dinâmica - demanda menos dados”, ou seja, apenas aspectos críticos do modelo microscópico são considerados e abstraídos para lidar em um nível mais genérico, por isto, modelos mesoscópicos “são mais eficientes computacionalmente em relação a modelos microscópicos” (BARCELÓ, 2010). Este tipo de modelagem procura unir alguns aspectos da modelagem microscópica (sua capacidade de obter informações sobre o indivíduo e seu processo de decisão), a aspectos da simulação macroscópica, qual seja, o comportamento dinâmico, de forma a simplificar o modelo, sem, no entanto, que

esta simplificação prejudique a observação de comportamentos possíveis apenas com o grande detalhamento observável em simulações microscópicas.

Segundo o autor, podemos classificar a simulação mesoscópica em dois grupos: modelos nos quais veículos não são considerados individualmente, mas sim em pequenos grupos; e modelos que a despeito de considerar os veículos individualmente, acabam por simplificar sua modelagem e conjunto de regras de deslocamento. O primeiro, em geral, tem por objetivo reduzir o custo computacional do modelo, enquanto o segundo é voltado para situações as quais, mais que o comportamento individual, procura-se evidenciar o comportamento de um determinado segmento de tráfego.

Apesar de o enfoque de Barceló (2010) estar em simulações de veículos em rodovias e outras situações análogas, é possível compreender tais modelos como aplicáveis a outros meios de transporte, ou mesmo ao comportamento de pedestres, bastando para tal adaptar os conceitos para o meio em questão. Adiante, esta classificação será utilizada para a análise dos trabalhos correlatos, servindo de base para o entendimento do contexto e implicações desses trabalhos.

2.3 Qual meio de transporte escolher? O processo de decisão do usuário

Um dos principais pontos relativos à modelagem de um sistema de transporte envolve a compreensão do processo de decisão do usuário em relação à definição da rota utilizada dentro do sistema. Em outras palavras, trata-se da definição sobre como será feita a alimentação do modelo de simulação. Esta seção faz algumas considerações acerca deste tópico, identificando os principais fatores envolvidos nesta modelagem.

Segundo Órtuzar (2011), há dois paradigmas principais sobre a modelagem de tomada de decisão presentes na literatura: *substantive rationality* (KAY, 2010) e o *muddling through* (LINDBLOM, 1959).

O paradigma denominado *substantive rationality*, segundo Órtuzar (2011), também citado na literatura como a abordagem sistêmica do processo de decisão, é o mais frequentemente adotado e assume que todo o processo de decisão do usuário é baseado no pleno conhecimento deste acerca dos objetivos e de todos os caminhos disponíveis para alcançá-los, sendo possível então que o usuário determine o custo benefício de cada um destes caminhos e, a partir daí, faça a escolha daquele com melhores características. Este paradigma requer total quantificação dos fatores de influência. Nele, o problema da de-

ção é visto como a escolha de uma opção num conjunto de alternativas e cenários e suas estimativas probabilísticas de ocorrência. Desta forma, cada uma das alternativas é quantificada a partir de sua relação de custo benefício, caracterizando assim a decisão a ser tomada.

Todavia, este paradigma tem uma série de problemas em sua implementação. O primeiro ponto mencionado por Órtuzar (2011) é que alguns fatores não são facilmente quantificáveis, como custos e tempo, no sentido que o primeiro depende diretamente de outros fatores, como por exemplo, a renda do usuário e a situação econômica do ambiente, e o segundo, dos objetivos do deslocamento e do perfil do usuário. Ainda, os resultados deste modelo tendem a fugir dos “anseios do público”, uma vez que, a despeito de desejarem “sistemas otimizados, eles desejam sistemas os quais vejam progressos sustentados em linhas que são difíceis de identificar” como, por exemplo, “querem o aumento da velocidade, mas reclamam do barulho associado e emissões”. Ainda, Kay (2010) argumenta que há diversos exemplos de organizações que adotaram diretamente o processo de decisão racional e cujos resultados falharam consideravelmente após alguns anos.

Já o paradigma *muddling through* (também mencionado como “abordagem oblíqua ou indireta”) advém das ideias apresentadas por Lindblom (1959). Ele é caracterizado por uma maior abstração com relação aos objetivos, que apenas são “fracamente definidos, sem a tentativa de quantificá-los” (ÓRTUZAR, 2011). Ainda, há o reconhecimento de que o ambiente é incerto e que não há definições diretas sobre os eventos que podem ocorrer futuramente. Não há uma perspectiva sobre atingir “todo o alcance das opções disponíveis”, limitando-se a trabalhar apenas com “um conjunto limitado” de opções.

A tabela 1 apresenta mais alguns contrastes entre os dois paradigmas que são relevantes na escolha por um ou outro e a forma de lidar com algumas situações típicas da modelagem e simulação de sistemas de transporte urbano.

O processo de decisão do usuário no contexto de sistemas de transporte urbano está também intimamente ligado ao objetivo do deslocamento e à atividade urbana a ele relacionada. Para tal, Rodrigue, Comtois e Slack (2007)² categoriza os tipos de movimento como “Pendulares”, “Profissionais” e “Pessoais”.

Movimentos “pendulares” são aqueles feitos pelos usuários em deslocamentos

²Os autores apontam também o tipo de movimento de “Distribuição”, relacionado ao transporte de mercadorias. Como não é o enfoque deste trabalho lidar com a simulação de transporte de mercadorias, optou-se pela omissão. A mesma opção foi feita com relação a movimentos “turísticos”, que se refere a deslocamento devido a eventos pontuais, como os Jogos Olímpicos, ou a cidades com um forte componente turístico. Para efeitos deste trabalho, enquadraremos tal tipo como a categoria “pessoal”

Tabela 1 – Comparação entre aspectos dos modelos *Substantive Rationality* e *Muddling Through*

Fonte: Baseada em (ÓRTUZAR, 2011)

<i>Substantive Rationality</i>	Categoria	<i>Muddling Through</i>
Interações com outros componentes são limitadas e suas respostas dependem de suas ações apenas	Interações	A saída das interações com os outros componentes dependem do contexto e da interpretação de suas intenções
O relacionamento entre objetivos, estados, metas e ações são compreensíveis	Complexidade	O entendimento dos relacionamentos entre objetivos, estados, metas e ações são imperfeitos, mas podem ser melhorados com a experiência
O problema e o contexto podem ser descritos por um modelo analítico bem especificado e estimado	Abstração	A apropriada simplificação de problemas complexos devem se basear no julgamento e compreensão do contexto
O que ocorre é o que se deseja que ocorra	Intencionalidade	O que ocorre é resultado de um processo complexo sobre qual não há completo entendimento
Decisões são feitas com base no maior número de informações possíveis	Informação	Decisões são recomendadas e feitas tendo-se em mente que apenas uma porção limitada do conhecimento está disponível
A melhor saída é obtida através de um processo consciente de maximização	Adaptação	Bons resultados são obtidos através da adaptação às mudanças de condições
Regras e diretrizes podem ser definidas para permitir que as pessoas encontrem soluções corretas	Custo	Especialistas podem fazer coisas que outros não podem - e tem dificuldade na aprendizagem

cíclicos, por exemplo, de casa para o trabalho de manhã e do trabalho para casa no fim do expediente. Eles são altamente cíclicos, já que são previsíveis e recorrentes, em geral de ocorrência diária, podendo ser entendidos como movimentos compulsórios.

Por sua vez, movimentos “profissionais” estão relacionados a atividades ligadas ao trabalho, nas quais o usuário se dirige a reuniões ou eventos, ocorrendo normalmente em dias úteis, em horário de expediente.

Por fim, movimentos “pessoais” ocorrem quando o usuário se desloca de forma voluntária, podendo ocorrer a qualquer momento. Geralmente são deslocamentos atrela-

dos a atividades comerciais e têm como destino locais de lazer e recreação ou a centros comerciais.

O tipo de deslocamento é fundamental para a caracterização do processo de decisão, uma vez que, de acordo com o objetivo, as variáveis podem ser consideradas de forma distinta, por exemplo, movimentos “pendulares” e “profissionais” são menos tolerante a atrasos e mudanças de horário de chegada ao destino do que movimentos “pessoais”.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os fundamentos teóricos utilizados na construção deste trabalho.

Na primeira seção, foram apresentados os conceitos utilizados no estudo de sistemas de transporte e seus principais aspectos. Foi apresentado o conceito de nós e ligações, aspectos funcionais de tais sistemas, variáveis e aspectos a serem considerados.

Na seção seguinte, foram tratados dos tipos de modelagem simulação disponíveis para tal tipo de sistemas, sendo elas: microscópica, macroscópica e mesoscópica. Foram apresentados os conceitos e forma de operação de cada tipo de simulação.

A terceira seção apresenta os aspectos relacionados ao processo de decisão do usuário sobre qual rota escolher no uso de um sistema de transporte. São discutidas duas abordagens amplamente vistas na literatura: *Substantive Rationality* e *Muddling Through*.

Sendo assim, este capítulo apresentou conceitos teóricos utilizados o desenvolvimento deste trabalho, os quais foram observados na construção das revisões sistemáticas apresentadas no capítulo a seguir e também na construção do modelo.

3 Levantamento Bibliográfico

De forma a contextualizar o trabalho proposto em relação ao estado da arte da simulação de sistemas de tráfego e transporte urbano, foram feitas duas revisões sistemáticas. A primeira, tratada na primeira seção, visa a identificar o estado da arte na simulação de sistemas de transporte usando múltiplos meios. A segunda, tratada na segunda seção, tem por objetivo identificar as principais técnicas envolvidas na simulação de comportamento e processo de decisão do usuário. Por fim, na última seção, os resultados destas revisões são sumarizadas em relação ao corrente trabalho.

3.1 Simulação de sistemas de transporte usando múltiplos meios

O objetivo desta revisão sistemática foi encontrar os trabalhos mais recentes relativos à simulação multimodal de sistemas de transporte. A intenção foi identificar os trabalhos que implementam a simulação de meios de transporte, por exemplo, transporte público, bicicletas, pedestres, ou algum destes modais combinados com veículos, a fim de identificar o impacto e influência de um meio sobre o outro.

3.1.1 Método de Revisão

Foram considerados artigos que, ou apresentavam a implementação de um modelo de simulação, ou que, a despeito de não apresentarem a implementação de um modelo, apresentavam claramente a técnica de simulação utilizada. Assim, a intenção é observar quais os modelos atualmente em uso, dificuldades no processo de modelagem e simulação e possíveis extensões aos trabalhos existentes. Ressalta-se aqui que o objetivo da revisão restringe-se ao ambiente urbano, portanto, modais não envolvidos com o sistema de transporte urbano (por exemplo, aviões) foram desconsiderados.

O levantamento dos artigos foi feito com base nas principais bibliotecas digitais de artigos e conferências relacionadas à área de Computação e Engenharia:

- IEEEExplore, do IEEE;
- ACM Digital Library, da Association of Computing Machinery;

- Springer Link, da Springer;
- SciVerse Scopus, da Elsevier.

Como critérios para esta revisão, foram considerados os seguintes parâmetros para a inclusão de artigos:

- Trabalhos que apresentem sistemas inteligentes de transporte que envolvam implementação de simulação multimodal;
Ou
- Trabalhos de revisão que apresentem um panorama sobre sistemas inteligentes de transporte que envolvam ao menos dois modais, com uma relação de dependência entre os mesmos;
Ou
- Trabalhos que apresentem sistemas inteligentes de transporte que, a despeito de envolverem principalmente um modal, envolva a implementação da interferência de algum modal sobre este, por exemplo, a implementação da simulação de tráfego de veículos que considere a interferência de pedestres sobre a via, mesmo que o comportamento dos pedestres não seja completamente modelado;
Ou
- Trabalhos que apresentem a simulação de apenas um meio de deslocamento urbano, contanto que não seja apenas relativo à transporte individual;
E
- Trabalhos publicados de 2006 em diante.

Foram adotados alguns critérios de exclusão para descartar trabalhos que se enquadraram nas chaves de pesquisa utilizadas mas que fogem do objetivo da revisão. São eles:

- Trabalhos que implementem simulação apenas para um meio de transporte, sendo este meio o transporte individual, em especial, veículos automotores;
- Trabalhos sobre sistemas inteligentes de transporte que envolvam modais não relacionados ao transporte urbano, por exemplo, aviões e barcos. Caso um destes modais

esteja inserido no cenário urbano, o trabalho não se enquadra neste critério de exclusão (por exemplo, balsas para a travessia de um rio que corte uma determinada cidade);

- Trabalhos que não implementem nem apresentem indicações claras sobre a implementação utilizada para a simulação;
- Trabalhos não disponíveis na íntegra para acesso.

Também é importante mencionar que, no caso de bases de conhecimento com grande abrangência, como por exemplo a Scopus, foram considerados apenas os trabalhos publicados em conferências e publicações de áreas pertinentes, sendo elas: Computação, Engenharia Civil, Engenharia de Tráfego, Planejamento Urbano e correlatas.

A partir de tais critérios foi feita a extração dos artigos nas bases selecionadas. Uma vez extraídos os artigos, foram lidos na íntegra aqueles que se enquadraram nos critérios de inclusão, com o objetivo de identificar quais os meios previstos pela simulação e seu objetivo e, dos modelos de simulação apresentados, quais foram utilizados e as considerações sobre a opção, quando apresentadas pelo autor. Por fim, foram levantadas as possibilidades de trabalhos futuros apontadas nestes trabalhos ou indiretamente identificadas a partir da leitura dos textos e estudo da fundamentação teórica.

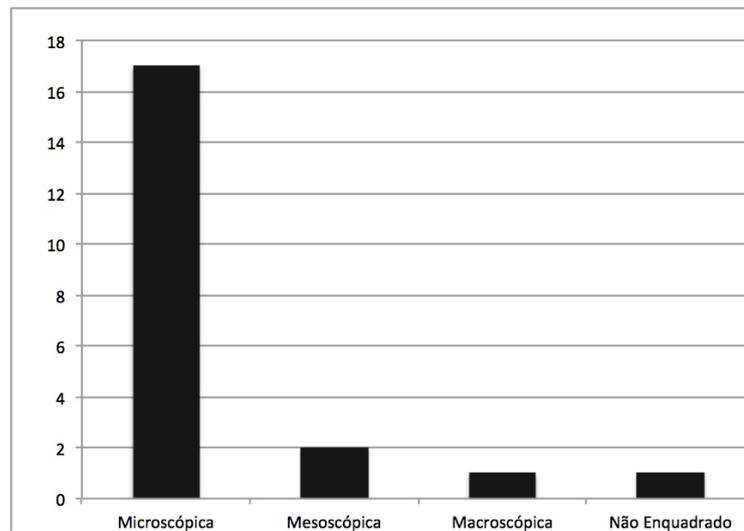
3.1.2 Condução da Revisão

A partir das fontes de dados anteriormente mencionadas, foram localizados 143 artigos, dos quais, após a triagem a partir dos critérios adotados, foram selecionados 21 artigos para a análise.

Tais artigos foram classificados em relação ao modelo de simulação adotado, considerando os três tipos de modelos anteriormente discutidos (figura 5). Entre os artigos, 17 apresentaram a implementação de um modelo microscópico, enquanto um tratou o seu cenário com uma simulação macroscópica e dois deles apresentaram uma abordagem mesoscópica para o problema. Um dos artigos, porém, apresentou uma visão diferente para o problema que não pôde, de imediato, ser classificada em nenhuma das três categorias propostas. Tal caso será discutido posteriormente.

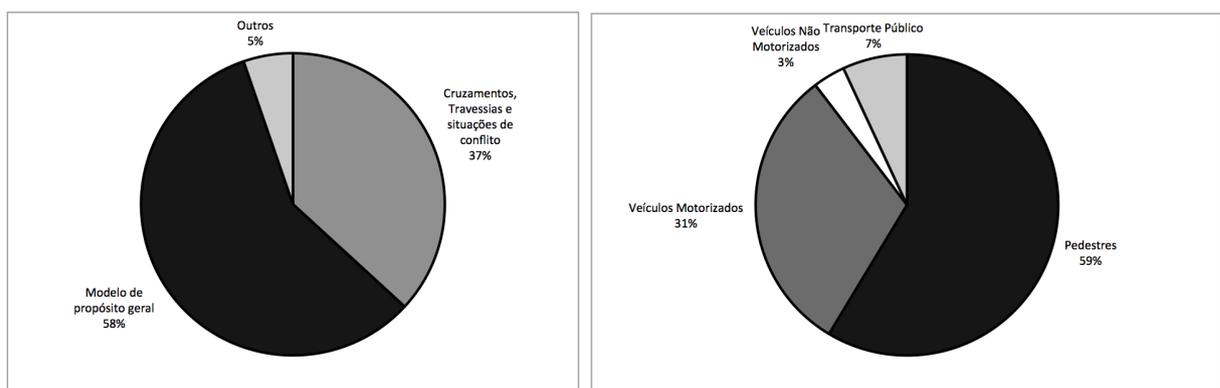
Outra forma de classificação adotada para a análise dos trabalhos foi com relação aos meios previstos pela simulação, conforme os gráficos na figura 6. A maioria dos trabalhos, de alguma forma, envolveu veículos automotores que poderiam ser considerados

Figura 5 – Artigos por tipo de simulação



como um modal de transporte individual, porém, com a representação de pedestres como componente principal. Ressalta-se também uma parcela significativa dos trabalhos que trata da relação veículos-pedestres em situações de cruzamento (cerca de 37% dos trabalhos analisados).

Figura 6 – Artigos por objetivo da simulação e artigos por meio previsto



O comportamento do pedestre nas simulações supracitadas é feita de duas formas: através de autômatos celulares ou a partir de agentes inteligentes. Nos trabalhos em que não foi realizada a implementação do comportamento do pedestre, foi utilizado um software para tal fim, o VISSIM ¹, da empresa PTV ², caso dos trabalhos Gao et al. (2009), Ma, Ma e Yang (2008), Ma e Yang (2009) e Pan et al. (2010).

¹<http://www.ptvamerica.com/software/ptv-vision/vissim/>

²<http://www.ptvamerica.com>

Os autômatos celulares usados nos trabalhos estudados seguiam essencialmente a mesma configuração. Foi utilizada uma representação bidimensional com variações na configuração da malha representando o ambiente.

No trabalho de Chen, Bärwolff e Schwandt (2010), o objetivo proposto é o de estudar o processo de transição entre células dos pedestres e as situações de conflito (e sua resolução) resultantes, o que, segundo os autores, pode ser feito na mesma etapa. Para tal, primeiro são discutidos os modelos utilizando uma ou duas dimensões com autômatos celulares e o porquê este último se mostra o mais adequado para tratar a simulação do deslocamento de pedestres. Então, tomando por base o modelo bidimensional, a decisão do próximo passo do pedestre é feita com base na análise probabilística do cenário ao redor, levando em conta seu objetivo, fatores envolvendo distância, a “previsão” pelo pedestre do deslocamento dos seus vizinhos e, também, a resolução de conflitos quando da sua ocorrência. Ainda, é introduzida a ideia de passos envolvendo mais de uma célula, ou seja, a cobertura de uma maior distância pelo pedestre, o que implica também no deslocamento diagonal do pedestre na grade (o que, considerando apenas movimentos na vertical e horizontal implicaria em dois passos). Por fim, o modelo é validado a partir de uma simulação simples, com dois grupos de pedestres um em cada ponta de um quadrado, na qual objetivo é percorrer a diagonal. Modelo similar é encontrado no trabalho de Wang e Chen (2009).

Por sua vez, nos trabalhos de Huixin e Wenhong (2010) e de Ma et al. (2011), o objetivo é estudar a influência no tráfego de veículos causada pelo fluxo de pedestres. Enquanto no primeiro é proposto um modelo de propósito geral, o segundo trata o caso específico do deslocamento de pedestres no contra-fluxo em relação aos veículos. Para tal, em ambos os casos foi definida uma malha de tamanho fixo, tendo dois tipos de autômatos, com regras distintas: pedestres e veículos. Em ambos os trabalhos, o comportamento do deslocamento do pedestre foi definido com a inserção do mesmo na simulação com um objetivo de destino. O deslocamento é determinado por meio do deslocamento linear até o ponto de destino, uma célula por vez, na vertical ou horizontal e, em caso de conflito, o pedestre desloca-se sempre à sua direita. Em Ma et al. (2011), além do deslocamento, na detecção de conflito eminente com veículos, a velocidade de deslocamento do pedestre é aumentada, voltando ao seu estado inicial quando a situação de conflito se desfaz, o que implica que os autômatos aqui têm velocidade variável. Já o comportamento dos veículos, em Huixin e Wenhong (2010) é definido pelo modelo *car-following* com o acréscimo de regras para lidar com situações de conflitos com pedestres, enquanto Ma et al. (2011) trata a situação de forma simplificada, um veículo por vez, com uma faixa de rolagem

apenas, sendo o movimento definido pelas equações de movimento retilíneo uniformemente variado, da mecânica clássica, havendo desaceleração do veículo, podendo chegar a parada completa, em casos de conflito.

Em Wang et al. (2009) é definido um modelo denominado “detecção de pontos de conflito” para simulação de tráfego misto em cruzamentos e este modelo é contrastado ao modelo de autômatos celulares. Neste modelo, ao invés do deslocamento dos autômatos pelo grid, o deslocamento é determinado por um conjunto de componentes: a representação da rede, a função de dinâmica do sistema, a função de negociação de conflito e o fluxo da simulação. A rede é representada a partir dos chamados “pontos de colisão”, que são os pontos nos quais, a partir das trajetórias dos componentes da simulação, será necessário o tratamento da colisão (por exemplo, as faixas de pedestres do cruzamento). Cada um dos tipos de unidades móveis (pedestres, veículos, entre outros), tem a sua função dinâmica definida, que é responsável por determinar o comportamento padrão do ator no modelo. A função de negociação de conflitos, trata as mudanças de trajetória, desaceleração e outros comportamentos necessários para a eliminação de conflitos da detecção de provável colisão. Por fim, a função de dinâmica da simulação se dá de forma similar à representação por autômatos celulares, onde cada um dos autômatos verifica sua vizinhança e determina seu comportamento a partir daí.

A fim de fazer a comparação proposta, nesse trabalho foi utilizada a modelagem de comportamento dos autômatos proposta por Simon e Nagel (1998)³, na qual o comportamento dos autômatos é dado a partir de uma série de propriedades da via (velocidade, sentido de deslocamento, capacidade) e a decisão sobre como atuar em caso de conflito é dada a partir da comparação dessas variáveis e propriedades do autômato em conflito.

A utilização de agentes inteligentes se deu nos trabalhos de Klügl e Rindsfuser (2007), Kretz et al. (2011), Usher, Liu e Kolstad (2010) e Xiaobei, Hui e Hongwei (2009). Nestes trabalhos, a abordagem utilizada foi similar, com a definição de um grid representando o cenário onde se deseja o deslocamento, a definição de objetos com um conjunto de eventos atrelados e os pedestres, os agentes propriamente ditos, nos quais foram definidas regras para a determinação do caminho a ser seguido e uma série de eventos buscando lidar com situações de conflito (colisões com objetos ou outros agentes do modelo). Nestes trabalhos, todavia, foi feita apenas a simulação de pedestres em uma série de cenários, em geral modelos que, a despeito de terem sido feitos com base em um cenário fixo, foram planejados para uso em múltiplas situações. Então o que se tem como resultado de tais

³Este trabalho apresenta uma abordagem apenas para veículos, sem indicar como foi tratado o pedestre

trabalhos é a modelagem do comportamento dos pedestres em um determinado cenário, no qual, durante a execução se observam os fluxos de deslocamento no ambiente.

Os trabalhos de Klügl e Rindsfuser (2007), Usher, Liu e Kolstad (2010) e Xiaobei, Hui e Hongwei (2009) apresentam simulações com o objetivo de entender o processo de deslocamento de pedestres como um todo e de forma muito semelhante. Nestes o pedestre possui como objetivo atingir um determinado ponto no ambiente de simulação, para atingir este objetivo, o pedestre sempre procura a rota mais curta (por distância euclidiana), recalculando esta rota a medida que observa obstáculos em seu entorno. É importante observar que o trabalho de Klügl e Rindsfuser (2007) fez uso de um software para simulação de agentes inteligentes, o SeSAM⁴, implementado pela mesma equipe envolvida no trabalho. Enquanto isso, o trabalho de Kretz et al. (2011) diferiu por se preocupar com o processo de decisão do usuário para a escolha do caminho mais rápido, tendo em vista, além de um ponto de destino, um determinado horário necessário para a chegada, condizente com o cenário proposto, de uma estação ferroviária. Assim sendo, as tomadas de decisão e replanejamento da rota eram tomadas com base nos obstáculos e tendo em vista caminhos com menor densidade de pedestres, ou seja, onde o deslocamento é feito com uma maior velocidade, considerando também o equilíbrio entre a rota de maior velocidade e a de menor distância.

Por fim, dos trabalhos que abordam a simulação de pedestres por meio de modelos microscópicos, temos os trabalhos que fizeram uso do VISSIM, tais como os trabalhos de Gao et al. (2009), Ma, Ma e Yang (2008), Ma e Yang (2009) e Pan et al. (2010). Apesar de não ser evidenciada nos trabalhos a forma como é feita a simulação, sabe-se, a partir da descrição feita por Barceló (2010) acerca da ferramenta, que é utilizado um modelo conhecido como *Social Forces*, discutido em detalhes no trabalho de Helbing e Mólnar (1995). Este trabalho, essencialmente, propõe que o movimento do pedestre e a escolha de um determinado trajeto é dada, além do deslocamento básico, por uma série de influências externas, chamadas de forças sociais, as quais exercem impactos no deslocamento, representando, a grosso modo, uma abordagem contrária ao modelo por agentes, uma vez que o pedestre é passivo diante das chamadas forças sociais. O desenvolvimento de tal modelo, sua base teórica e formulação matemática são discutidas em detalhes no referido artigo.

Ainda a respeito destes trabalhos, pela utilização da ferramenta e não especificação em contrário nos referidos trabalhos, assume-se que foi utilizado o modelo padrão

⁴<http://130.243.124.21/sesam/index.php>

da ferramenta para a simulação de veículos. Tal simulação é feita, ainda segundo o exposto no trabalho de Barceló (2010), seguindo o modelo *car-following*, discutido anteriormente.

Também foram encontrados trabalhos que apresentam simulações diferentes de modelos microscópicos. No trabalho de Xue et al. (2009) é apresentado um modelo de rede bidimensional de deslocamento de pedestres onde a definição de caminhos e transições e o processo de escolha do pedestre é feita de acordo com um modelo matemático hidrodinâmico, o qual impacta todo o modelo, ou seja, por sua característica híbrida (o pedestre influenciado pela simulação também do universo no qual está inserido e regido por formulações globais), caracteriza-se como um modelo de simulação mesoscópica.

O trabalho de Jin e White (2012), por sua vez, apresenta um modelo de simulação também baseado em agentes inteligentes, com o objetivo de identificar as características de uma determinada área as quais exercem influencia sobre o processo de escolha de rotas de um determinado pedestre. Aqui, ao contrário dos outros trabalhos que apresentam a abordagem de agentes, a simulação leva em conta não obstáculos individuais, como pedestres e paredes, mas sim fatores do ambiente que está sendo estudado, por exemplo, objetivos de deslocamento (lazer, trabalho), favorecimento a utilização de veículos ou a pedestres (a partir da concepção do “mapa” da região), fatores socioeconômicos, entre outros. Por não tratar diretamente do deslocamento do pedestre no cenário e sim tratar de uma visão um pouco mais distante, mas por ainda observar o indivíduo, podemos considerar a implementação de um modelo mesoscópico para o cenário.

Com relação a simulação macroscópica, temos o modelo proposto por Al-nasur e Kachroo (2006), o qual estabelece um modelo macroscópico a partir de um modelo microscópico. No trabalho, parte-se do modelo *car-following*, microscópico e unidimensional, voltado para veículos, e chega-se a um modelo macroscópico para pedestres, bidimensional.

Os trabalhos de Huang e Wu (2008) e Huang e Wu (2009) por sua vez são voltados para a simulação do comportamento de ciclistas. Na essência, os dois artigos se referem a um mesmo trabalho, sendo que o último é a versão mais atualizada (e completa). Nele, é feita uma modelagem utilizando lógica *fuzzy*, de forma a simular o processo de decisão de ciclistas na escolha de rotas em uma situação de cruzamento. Neste modelo são consideradas como variáveis os obstáculos presentes, velocidade do ciclista e dos objetos envolvidos, caminhos possíveis e riscos de colisão percebidos.

Por fim, temos o artigo de Lioris, Cohen e Fortelle (2010), que, de imediato, não foi enquadrado em nenhum dos modelos de simulação. O trabalho apresenta o planejamento

e simulação de um sistema de táxis coletivos, ou seja, táxis onde há mais de um passageiro, com destinos distintos. A simulação é feita por meio de um sistema de eventos discretos, ou seja, o estado do modelo é controlado pelo gerenciamento destes eventos (então, não há um papel ativo do “táxi” no sistema, sendo a simulação feita pela mudança de status das variáveis do sistema). Pela descrição dada pelo autor, o modelo se aproxima com os vistos nos trabalhos envolvendo agentes inteligentes, todavia, há elementos de simulações mesoscópicas, uma vez que alguns pontos do modelo são tratados desta forma.

Através da análise dos artigos, foi possível observar que, em sua grande maioria, é mencionada a pobreza de dados disponíveis para a validação das simulações e modelos propostos. Nesses artigos, os autores em geral mencionam que o próximo passo é justamente a obtenção de dados empíricos, para então efetuar uma validação mais extensa de seus modelos (CHEN; BÄRWOLFF; SCHWANDT, 2010) e (XIAOBEI; HUI; HONGWEI, 2009). Apenas no trabalho de Huang e Wu (2009), ou seja, em sua versão mais completa, há uma explicação detalhada sobre como a validação do modelo foi feita a partir da coleta de dados colhidos do monitoramento por meio de vídeo de um cruzamento e a comparação com o mesmo cenário na simulação implementada.

Sobre as sugestões de trabalhos futuros, Chen, Bärwolff e Schwandt (2010), Huang e Wu (2009), Wang e Chen (2009) propõem o refinamento dos modelos propostos, enquanto Al-nasur e Kachroo (2006), Chen, Bärwolff e Schwandt (2010), Pan et al. (2010), Wang e Chen (2009) e Xiaobei, Hui e Hongwei (2009) propõe a revalidação dos modelos a partir da coleta de dados e pesquisas empíricas. Os artigos não mencionados não apresentaram direcionamentos neste sentido, mas também nota-se a falta de menções mais detalhadas acerca da validação dos modelos apresentados.

3.2 O Processo de decisão do usuário

Nesta segunda revisão, o objetivo foi identificar técnicas para o tratamento do processo de decisão do usuário na escolha de caminhos em sistemas de simulação de transporte, enfocando na modelagem do processo de decisão do usuário acerca da escolha de rotas e meios a serem utilizados, identificando as principais técnicas e suas situações de aplicação.

3.2.1 Método de Revisão

Para identificar os artigos relacionados com o estado da arte da área, foi realizado um processo de revisão sistemática para a seleção e filtragem dos artigos. Tal processo foi fundamentado por uma análise exploratória prévia do objeto de estudo e então uma análise mais detalhada da literatura base acerca do assunto, na qual os principais tópicos relativos a esta revisão foram anteriormente expostos e também a partir da revisão exposta na seção anterior.

Assim, objetivou-se a elucidar as seguintes questões:

- Quais os trabalhos mais recentes focados na implementação do processo de decisão do usuário na escolha de rotas em sistemas de transporte urbano;
- Como normalmente é implementado o processo de decisão do usuário em sistemas de simulação de transporte;
- Qual é a abordagem utilizada nestes trabalhos, suas vantagens e desvantagens, quando apontadas;
- Quais os pontos de evolução sugeridos nestes trabalhos.

Com base em tais questionamentos, foram definidos critérios para a seleção dos trabalhos a serem analisados. Para a inclusão, o trabalho deve:

- Tratar da simulação de tráfego ou transporte urbano;
- Apresentar a descrição sobre o método utilizado para o processo de decisão do usuário acerca de rotas e ações na simulação.
- Apresentar mecanismos inteligentes para o processo de decisão;
- Não apresentar o processo de decisão apenas para componentes não integrantes do fluxo de deslocamento da simulação (por exemplo, agentes de trânsito).
- Não apresentar exclusivamente processos de decisão relativos a objetos do modelo de simulação, como por exemplo, semáforos;
- Ter sido publicado nos últimos 10 anos;

Ainda, foram adotados como critérios para seleção dos artigos, aqueles cuja publicação ocorreu em periódicos ou eventos devidamente reconhecidos pela área.

Para a seleção das fontes, foram tomados como critério dois pontos: disponibilidade de artigos na íntegra para acesso e relacionamento com as principais conferências e periódicos relacionados ao tema. Fontes de dados que indexem artigos de terceiros, como o Google Scholar por exemplo, foram desconsideradas, uma vez que há muito ruído, com artigos ainda não publicados oficialmente, repetição de resultados das principais bases, e alta incidência de artigos não disponíveis. Sendo assim, foram utilizadas as seguintes fontes:

- IEEEExplore, do IEEE;
- ACM Digital Library, da Association of Computing Machinery;
- Springer Link, da Springer;
- SciVerse Scopus, da Elsevier.

Os artigos localizados a partir da busca nas referidas bases foram filtrados de acordo com os critérios expostos. Uma vez selecionados, foram lidos na íntegra, onde foi feito o levantamento dos pontos relevantes sobre este artigo, somados a informações sobre o modelo de simulação utilizado, o processo de decisão utilizado e as principais evoluções sugeridas por esses trabalhos. Tal levantamento será exposto e discutido a seguir.

3.2.2 Condução da Revisão

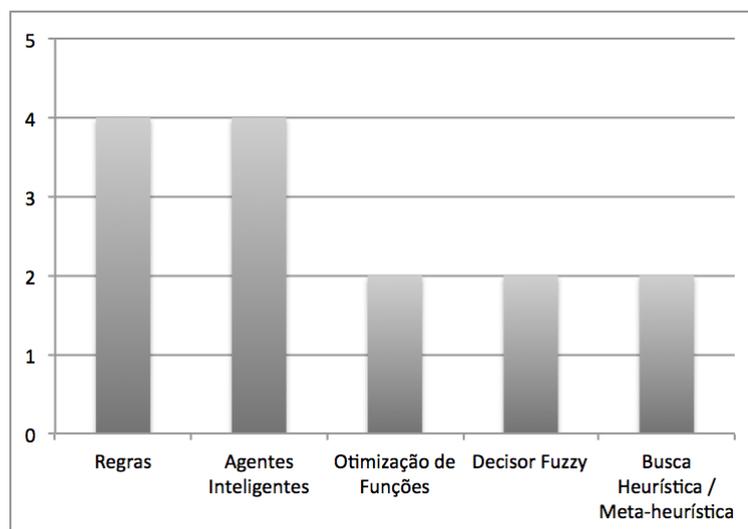
Foram localizados 70 artigos nas fontes de dados selecionadas para este trabalho, sendo que, após a filtragem utilizando os critérios anteriormente expostos, restaram 15 artigos. Destes artigos, todos apresentam modelagens microscópicas para a simulação, o que confirma o exposto na fundamentação teórica, acerca da relação entre este tipo de simulação e o processo de decisão.

Dos trabalhos selecionados, apenas o trabalho de Afshordi e Meybodi (2007) trata apenas do processo de decisão, enquanto o restante implementa simulação utilizando agentes inteligentes, com variações em seu mecanismo de planejamento e decisão. Tal situação está de acordo com o observado na revisão anterior, na qual os modelos microscópicos expostos ou foram implementadas utilizando autômatos celulares (em geral,

quando a simulação tratava apenas de pedestres), ou foram implementadas utilizando agentes inteligentes, em geral quando envolviam mais de um meio.

Sobre as estratégias utilizadas para o processo de decisão, os artigos estão assim distribuídos (figura 7): há quatro artigos que tratam de agentes inteligentes com mecanismos de aprendizado para aprimoramento de seu comportamento, quatro artigos que fazem uso de regras, dois artigos que apresentam decisores fuzzy para a simulação da escolha, dois artigos que apresentam busca heurística ou meta-heurística como forma de tomar uma decisão e, por fim, dois trabalhos que apresentam mecanismos de maximização de funções para o processo de decisão.

Figura 7 – Distribuição dos artigos por estratégia utilizada no processo de decisão do usuário



Mecanismos de aprendizado em agentes inteligentes podem ser observados nos trabalhos de Radecký e Gajdos (2008), Klügl e Bazzan (2002) e Seele, Herpers e Bauckhage (2012). No trabalho de Radecký e Gajdos (2008), é proposto um mecanismo de aprendizado por experiência para a definição da melhor rota (no caso deste trabalho, rotas locais, como desvios de obstáculos, mudanças de faixa, entre outras situações) na simulação de veículos. O agente possui um banco de regras conhecidas e a decisão é tomada a partir dos comportamentos resultantes da combinação destas regras com os fatos observados pelo agente sobre sua vizinhança. Caso o agente se depare com alguma situação desconhecida, por exemplo, algum elemento do qual não tem conhecimento, por exemplo, uma poça de água, ele consulta os outros agentes no modelo. Assim que obtém a definição sobre o novo obstáculo, ele efetua alguma ação, combinando suas regras conhecidas com as novas regras obtidas a partir de outros agentes.

Já Klügl e Bazzan (2002) propõe uma heurística de aprendizado para a escolha de rotas entre múltiplos meios de transporte. No trabalho, a heurística proposta prevê que o agente escolha uma rota, armazene parâmetros desta rota e, com base nestes dados e a sensação de “benefício” a compare, na próxima iteração, com outras rotas, sendo selecionada aquela com maior valor. Caso seja escolhida uma nova rota, os parâmetros são armazenados pelo agente, ou seja, ele aprende o custo desta nova rota, sendo que, sabe-se que foi encontrada a melhor rota de fato quando da convergência do maior valor da relação.

No trabalho de Seele, Herpers e Bauckhage (2012) é apresentada uma abordagem cognitiva para o processo de decisão e aprendizado na simulação de veículos, com o objetivo de aumentar o realismo deste aspecto na simulação de veículos. São definidos perfis psicológicos para os agentes, por exemplo, agressivo, passivo e moderado, sendo que cada um destes perfis apresentam sua interpretação do ambiente. Tal separação em perfis é denominada princípio do egoísmo e tem por base que todo motorista, em maior ou menor grau, é egoísta quando visa a atingir o seu objetivo. Então, para decidir a rota, o agente analisa o ambiente e toma uma ação, com base no seu conhecimento e em seu perfil psicológico. O aprendizado se dá a partir das ações anteriores, as quais são armazenadas na “memória de longo prazo” do agente, influenciando suas decisões em situações de conflito. A percepção e o que é gravado na memória são influenciados também pelo perfil do agente. Porém, neste artigo não é tratado em detalhes como se dá este processo de aprendizado ou o que é armazenado na memória do agente. É sugerida como extensão do trabalho o acréscimo de mais possibilidades de emoções atreladas ao agente, além da aplicação de características dinâmicas (por exemplo, o motorista calmo passa a ficar nervoso se fica muito tempo parado esperando sua vez em situações de conflito).

Por sua vez, Kristoffersson e Alonso (2005) faz uma comparação entre três abordagens de processo de decisão para agentes inteligentes, uma de comportamento livre e duas baseadas em regras, de forma a avaliar em que condições quais delas se sobressaem em termos de velocidade média, colisões e travamentos. As arquiteturas previstas neste trabalho são a *free-rider*, a normativa e a por direitos. Na primeira, o agente analisa todas as suas possíveis ações (a partir das condições de seu entorno) e determina pesos. Destas ações, a que tiver maior valor é selecionada e executada. Na normativa, são definidos um conjunto de regras, por exemplo, “veículos não podem andar na faixa da esquerda a não ser que estejam ultrapassando”. O agente analisa seu entorno e atribui os pesos. Em seguida, estes pesos são atualizados, a partir do conjunto de normas (se estiver contra alguma norma, o valor é reduzido). Então a ação escolhida será aquela com maior peso.

Já a abordagem por direitos é similar a abordagem normativa porém, ao invés de definir o que o agente não pode fazer, é definido o que ele pode fazer (por exemplo, o agente tem direito a utilizar a velocidade máxima), de forma hierárquica, ou seja, o primeiro direito prevalece sobre os outros. A estrutura de decisão é semelhante a forma normativa: são levantadas as ações possíveis e a elas é atribuído um peso. Estes pesos são ajustados de acordo com a aderência aos valores e a ação que possuir maior valor é executada.

Então, de forma a testar as abordagens, foram executadas simulações com cada um dos modelos por 100 mil iterações, havendo sumarizações em um dado intervalo, com a seguinte quantidade de agentes: 50, 100, 300 e 500, considerando uma rodovia sem junções, com uma e com duas faixas. Após a execução do experimento, foi concluído que a abordagem *free-rider* possui o pior desempenho em cenários complexos todavia, em cenários simples, se sobressai em relação às outras abordagens. Porém quanto mais complexo o cenário, maior é a vantagem da abordagem por direitos. Segundo os autores, isso se dá porque esta abordagem se comporta, dependendo das circunstâncias, ou como a normativa ou como a *free-rider*.

Dos modelos baseados em regras, além do comparativo exposto no parágrafo anterior, temos os trabalhos de Esteves, Rossetti e Oliveira (2009)⁵, Lattner, Dallmeyer e Timm (2011) e Paruchuri, Pullalarevu e Karlapalem (2002). Esteves, Rossetti e Oliveira (2009) apresenta uma ferramenta própria para a simulação de pedestres, que permite a adição de *plugins*. Na ferramenta proposta, o processo de decisão sobre a rota a ser adotada é feito utilizando um conjunto de regras e comportamentos aplicados a este agente. Todavia, visto que o objetivo do trabalho é a construção da ferramenta, sendo a simulação atribuição do usuário (através de *plugins* a serem desenvolvidos), e por ser um trabalho em andamento ainda, o trabalho utiliza um conjunto simples de regras.

Por sua vez, o trabalho de Lattner, Dallmeyer e Timm (2011) tem por objetivo criar um modelo adaptativo para estradas, ou seja, um modelo que a partir das condições de tráfego, extraia informações e se adapte para as atuais condições, alterando parâmetros da via como a velocidade máxima, por exemplo. Com este objetivo, o autor implementa uma simulação com dois tipos de agentes, veículos e caminhões, cuja distribuição é configurada no início da simulação (a partir da definição de uma relação de proporção). O comportamento do veículo é dado por uma derivação do modelo apresentado por Nagel

⁵O trabalho localizado pelos mecanismos de busca (ESTEVEES et al., 2009), trata-se de um resumo estendido de um trabalho em andamento. Visto que o restante do trabalho não constava na extração inicial e, a despeito de ser um resumo estendido se enquadrava nos critérios, optou-se por buscar, através da instituição a qual os autores estão vinculados, o trabalho completo (ESTEVEES; ROSSETTI; OLIVEIRA, 2009).

e Schreckenberg (1992). Este modelo foi alterado para lidar com situações de tráfego urbano. Já o processo de decisão é feito a partir de um conjunto de regras, sendo uma parte delas inerentes ao veículo e outra a partir das regras do ambiente, por exemplo, velocidade máxima da via. Com base nestas informações o veículo decide qual será seu próximo movimento. Note que algumas destas regras são definidas a partir de parâmetros da via, então elas também estão sujeitas a atuação do mecanismo de aprendizagem. Este mecanismo é implementado usando classificadores a partir de uma ferramenta de terceiros (WEKA)⁶⁷. Por fim, o modelo foi testado com condições estáticas (velocidade máxima fixa) e condições dinâmicas (a ativação de um sinal forçando a mudança de faixas conforme o resultado do classificador). No segundo caso, a velocidade média final foi superior, implicando na vantagem da utilização do segundo modelo. Todavia, é apontado que a maior desvantagem desta abordagem dinâmica surge quando aumenta o número de opções de parâmetros possíveis, uma vez que este aumento implica também no aumento de iterações necessárias para achar a condição de equilíbrio do sistema, situação agravada quando vários parâmetros são levados em conta ao mesmo tempo.

Levando em conta graus de agressividade do motorista, o trabalho de Paruchuri, Pullalarevu e Karlapalem (2002) implementa um modelo de simulação de veículos, no qual o processo de decisão é orientado pelo perfil do motorista, assim como Seele, Herpers e Bauckhage (2012). Todavia diferente da técnica de aprendizado a partir dos mecanismos cognitivos, Paruchuri, Pullalarevu e Karlapalem (2002) leva em conta apenas a situação momentânea, sem considerar o histórico. Isto reduz o custo computacional da simulação, todavia deixa de lado a capacidade de aprendizado do agente com base no passado, o que elimina um aspecto importante do motorista. Diferentemente de Seele, Herpers e Bauckhage (2012), que prevê como extensões o acréscimo de mais fatores para decisão no modelo, por exemplo, travessias, alterações climáticas, entre outras. Porém o objetivo principal destes trabalhos é compartilhado, que é o de aumentar o realismo das simulações.

Apresentando um modelo para simulação de veículos, Bae et al. (2009) implementa a escolha da rota utilizando o algoritmo A* e o modelo *car-following*. O agente analisa qual será seu próximo movimento analisando a combinação de veículos e obstáculos (*car-following*) e, com base nestas informações, é executado o algoritmo A*, com o objetivo de obter a melhor rota para o objetivo a partir da situação atual (densidade de tráfego, velocidade, entre outras condições), a qual é atualizada e levada em consideração

⁶<http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>

⁷Nesse trabalho é apontado que utilizou um dos textos da bibliografia para a implementação do algoritmo mas a referência aponta diversos métodos para simulação e o trabalho não especifica qual método foi utilizado.

no próximo movimento.

Ainda seguindo a linha de buscas heurísticas, Rothkrantz (2009) faz a simulação de veículos com construção dinâmica de rotas, a partir da comunicação com outros veículos. Para tal, o autor propõe um modelo baseado na meta-heurística conhecida como colônia de formigas, no qual o agente caminha até um ponto de interesse e, uma vez que o localiza, libera sinalizadores (feromônios) que servem como atratores para outros agentes com o mesmo objetivo. Quando é encontrado algum obstáculo no caminho de volta, o agente muda de rota aleatoriamente e busca novamente o caminho original. O objetivo do trabalho é apresentar um modelo para implementação de software baseado em sensores e comunicação com outros veículos para o planejamento eficiente de rotas a ser aplicado em aparelhos de GPS, por exemplo. Para validar o modelo, foi feita a comparação entre o modelo proposto e um modelo utilizando o algoritmo de Dijkstra para a escolha do caminho, ou seja um modelo de roteamento estático. A execução se dá no planejamento de rotas de viagens entre cidades e, no caso do modelo dinâmico (colônia de formigas), pressupõe que outros veículos também utilizam o sistema. O resultado obtido pelo mecanismo dinâmico foi bastante superior ao modelo estático apresentando em quase 57% dos casos melhores alternativas de caminhos, considerando a execução da simulação reproduzindo a faixa de horário de pico. Ainda, um segundo experimento é feito mostrando que, quanto mais a taxa de adesão é ampliada, menor é o tempo de viagem para o mesmo caminho, implicando que o modelo tem potencial para melhorar as condições de tráfego.

Nos trabalhos de Huang e Wu (2008) e Huang e Wu (2009), é apresentada uma abordagem diferente no tratamento da simulação de ciclistas. Ambos os artigos são bastante similares e tem a mesma origem, sendo que o último possui alguns detalhes adicionais sobre a implementação feita. Nele, é feita uma modelagem utilizando lógica fuzzy, de forma a simular o processo de decisão de ciclistas na escolha de rotas em uma situação de cruzamento. Neste modelo são consideradas como variáveis os obstáculos presentes, velocidade do ciclista e dos objetos envolvidos, caminhos possíveis e riscos de colisão percebidos. Outros componentes aparecem no sistema, mas apenas como obstáculos para o ciclista. O modelo foi validado a partir de observações empíricas, com a gravação de vídeos de um cruzamento e comparação com o resultado da simulação das mesmas condições, todavia, os autores apontam que é necessária a validação mais cuidadosa do modelo, o que definem como próximos passos.

Ainda sobre trabalhos que envolvem decisores fuzzy, Afshordi e Meybodi (2007)

propõe um modelo para aprender as preferências de um motorista e então predizer o resultado da escolha deste motorista. Para tal, é utilizado um sistema híbrido com autômatos de aprendizado para o aprimoramento dos parâmetros de um decisor fuzzy. O sistema é composto por três componentes: um mecanismo para traçar a rota, um decisor fuzzy para a avaliação desta rota e autômatos de aprendizado para “aprender” as preferências do usuário e alimentar a parametrização das funções do decisor fuzzy, para que ele se torne capaz de inferir as próximas decisões de rota do usuário. Apesar deste mecanismo não estar atrelado diretamente a simulação do processo de decisão do usuário em simulações, o mecanismo fuzzy pode ser incorporado em uma simulação utilizando agentes inteligentes.

Outras duas abordagens diferentes para o problema em questão, nas quais o processo de decisão é feito com base em modelos matemáticos, são apresentadas nos trabalhos de Mandiau et al. (2008), com uma modelagem com base em teoria dos jogos, e Chaurasia et al. (2010), que propõe um modelo de decisão que utiliza, além da checagem de vizinhança, técnicas de programação linear para a escolha da melhor rota.

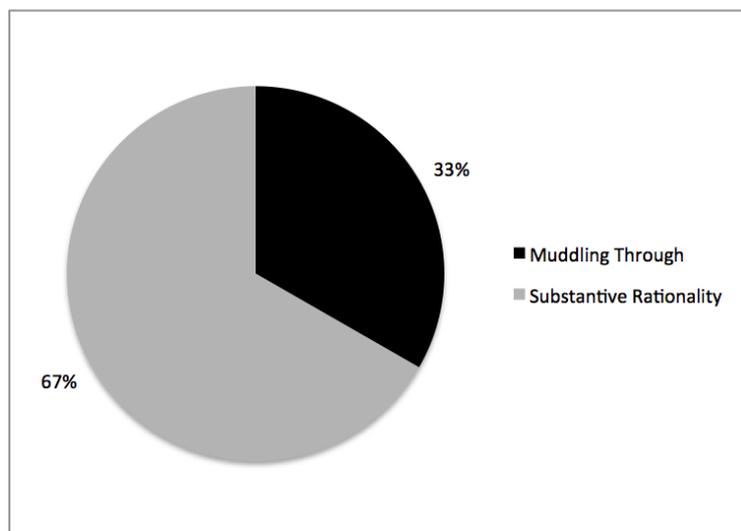
Já Mandiau et al. (2008) apresenta um modelo de processo de escolha do usuário para simulação de veículos, em situações de conflito, utilizando matrizes de decisão. Neste trabalho, são apresentados dois tipos de situação como exemplo, com dois ou três veículos em conflito, e também é apresentada a generalização do modelo para qualquer número de agentes. As matrizes são construídas de forma a representar a visão de cada um dos veículos acerca do problema. Sendo assim, é considerado que cada veículo tem apenas uma visão parcial sobre a situação, sem saber qual será o comportamento do outro veículo em conflito. Cada uma das matrizes é modelada como jogos, onde cada uma das células representa as situações de prioridade de um veículo em relação ao outro e representam o benefício percebido por cada um dos agentes, considerando que não há nenhum tipo de memória sobre as decisões anteriores dos agentes. Então, o objetivo de tais matrizes, para cada um dos agentes, dada sua situação, é maximizar os ganhos, e o maior ganho representa a decisão a ser tomada. Com base nisto, o trabalho procura validar o modelo executando simulações para dois e três agentes em conflito. Pelas experimentações, é possível observar a relação da velocidade dos agentes participantes mudando proporcionalmente nos cenários apresentados, condizendo com o esperado para tal simulação.

Por sua vez, Chaurasia et al. (2010), o deslocamento de veículos não é feito utilizando o modelo *car-following*, sendo adotada uma abordagem própria, baseada puramente em agentes e seu processo de decisão. Para tal, a simulação é configurada em um grid e são considerados dois mecanismos de processo de decisão: o *macro-planner* e o *micro-planner*.

O *macro-planner*, a partir da rota global averiguada, verifica as células do entorno em sua iteração, atribuindo valores a elas, *zero* para as dentro do caminho e sem obstáculos, *um* para as vizinhas destas e assim por diante, definindo valores mais altos quando da presença de obstáculos. Assim, o conjunto de células que representarão o caminho a ser adotado para aquela iteração é construído de forma a minimizar a soma dos valores das células deste caminho. O *micro-planner*, por sua vez, trata das questões pertinentes ao deslocamento do veículo, como por exemplo, o vetor de aceleração que deve ser utilizado para o deslocamento, de forma a evitar colisões e minimizar o tempo no trajeto. As equações de aceleração e deslocamento são definidas (originárias das equações de movimento retilíneo uniformemente variado, da mecânica clássica) e são utilizadas técnicas de programação linear, de forma a otimizar o valor de aceleração do veículo em questão. Também são implementados e testados diversos comportamentos e situações tais como ultrapassagens, tráfego intenso e semáforos. A partir dos testes realizados, com a criação de um ambiente no qual o objetivo do agente era atravessar uma dada região, foram obtidos dados considerados satisfatórios pelo autor acerca do desempenho computacional do modelo, no qual, para o ambiente utilizado, chegou-se a valores como 318ms para a simulação de 500 agentes simultâneos, valores estes satisfatórios para o trabalho em questão. Como evolução do modelo, são propostos: aumento da eficiência computacional com o uso de paralelismo e otimização e também a comparação do modelo com uma situação real, ou seja, a validação do modelo, para que ele possa ser, de fato, utilizado.

Considerando a classificação sobre o mecanismo de decisão apontada anteriormente, observa-se que 67% dos trabalhos apresentam uma abordagem voltada para o conceito *substantive rationality* - (RADECKÝ; GAJDOS, 2008), (KRISTOFFERSSON; ALONSO, 2005), (ESTEVES; ROSSETTI; OLIVEIRA, 2009), (LATTNER; DALLMEYER; TIMM, 2011), (BAE et al., 2009), (ROTHKRANTZ, 2009), (MANDIAU et al., 2008) e (CHAURASIA et al., 2010) - enquanto 33% dos trabalhos apresentam uma abordagem procurando atender os conceitos observados no *muddling through* - (KLÜGL; BAZZAN, 2002), (SEELE; HERPERS; BAUCKHAGE, 2012), (PARUCHURI; PULLALAREVU; KARLPALEM, 2002) e (HUANG; WU, 2009). É possível notar que os trabalhos que optaram por utilizar uma abordagem próxima do conceito de *muddling through* são aqueles cuja implementação do processo de decisão é o foco do trabalho, enquanto no restante, salvo exceções como nos trabalhos de Mandiau et al. (2008) e Chaurasia et al. (2010), o módulo de decisão é complementar ao objetivo do trabalho. Isto porque, segundo Órtuzar (2011), o *muddling through* exige um trabalho maior na definição das variáveis e suas relações, uma vez que sua ligação é indireta e subjetiva.

Figura 8 – Distribuição dos artigos por estratégia utilizada no processo de decisão



3.3 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentadas as duas revisões sistemáticas realizadas para a construção deste trabalho. Tais revisões buscaram a obtenção do estado da arte na área estudada.

A primeira revisão sistemática se propôs a elucidar o estado da arte para a simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos meios. A partir de tal revisão foi possível evidenciar a necessidade da construção deste trabalho, uma vez que a abordagem aqui proposta, procurando envolver múltiplos meios, foi pouco tratada nos trabalhos, os quais, em geral, procuraram tratar de simulações microscópicas de situações de conflito, principalmente entre pedestres e veículos em situação de cruzamento.

Tratando do processo de decisão do usuário, a segunda revisão procurou identificar as principais abordagens utilizadas. Foram identificados diversos tipos de trabalho, mas as abordagens que mais se destacaram foram as utilizando agentes inteligentes, com comportamentos definidos a partir de reações a eventos e situações ocorridas no cenário o qual estão inseridos, e sistemas de regras, também acionados por ocorrências no restante da simulação. Foi também identificada a predominância de processos de decisão utilizando *Substantive Rationality*.

Ambas as revisões sistemáticas foram de suma importância para a construção da proposta deste trabalho, uma vez que foi possível através de ambas observar as lacunas que o modelo proposto nesta dissertação pretende preencher.

4 Desenvolvimento

Este capítulo apresenta o modelo e o framework desenvolvidos, fundamentando e discutindo as decisões tomadas.

Em um primeiro momento, é apresentado o cenário utilizado para o desenvolvimento do modelo proposto, para a simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos modais. A seguir, são apresentados o framework para a construção da simulação e o processo de implementação, com as considerações feitas sobre o sistema a ser simulado e a aderência ao modelo aqui proposto.

4.1 Apresentação do Cenário - O Metrô de São Paulo

O Metropolitano de São Paulo (Metrô) é um sistema de transporte sobre trilhos que cobre o deslocamento de usuários pela cidade de São Paulo. É composto por cinco linhas, sendo quatro delas operadas pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, quais sejam, as linhas 1 - Azul, 2 - Verde, 3 - Vermelha e 5 - Lilás, e uma operada pela empresa Via Quatro, a linha 4 - Amarela. Atualmente, o sistema transporta diariamente cerca de 4,5 milhões de usuários e cobre a extensão de 74,2 quilômetros (COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 2014).

O Metrô está interligado com o sistema de ônibus urbano, por meio de terminais distribuídos por toda sua extensão, os quais propiciam a distribuição do fluxo para outras regiões as quais o metrô não alcança. Além dos ônibus urbanos, há ligações com o sistema de trens metropolitanos administrado pela Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM), o qual atende, além de bairros mais afastados, outros municípios na região denominada Grande São Paulo, a qual é formada por municípios no entorno da capital e que possuem alta dependência econômica da cidade. Somado ainda ao sistema, há as linhas de ônibus intermunicipal, também visando atender aos municípios desta área, complementando a oferta de transporte oferecida pela CPTM, incluindo municípios não atendidos pela mesma.

4.1.1 As linhas do Metropolitano de São Paulo

A seguir, são descritas as linhas existentes e características importantes sobre elas, procurando contextualizar o seu papel e principais pontos de interesses por elas distribuídos. A figura 9 apresenta o mapa detalhado do sistema de transporte metropolitano de São Paulo. A descrição feita aqui é ordenada de maneira cronológica em relação ao início de operação das linhas.

Figura 9 – Representação esquemática de linhas e conexões do Metrô de São Paulo

Fonte: Adaptação de (COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO, 2014)



A linha 1 - Azul foi a primeira a ser construída, iniciando sua operação em 1974, sendo formada por 23 estações. Possui conexões com a linha 2 - Verde, por meio das estações Ana Rosa e Paraiso, com a linha 3 - Vermelha na estação Sé e com a linha 4 - Amarela, na estação Luz. Estende-se por 20,2 km (a distância entre estações é apresentada na tabela 2), indo de bairros da zona norte da cidade de São Paulo, até bairros da zona sul. Possui, em sua extensão, conexão com dois terminais rodoviários, na estação Tietê e na estação Jabaquara, homônimos, e também conexões com o sistema de trens metropolitanos gerido pela CPTM, com as linhas: Coral, que atende a Zona Leste de São Paulo e municípios contíguos; Turquesa, que atende a região do Grande ABC, até o município de Paranapiacaba; e Rubi, que se estende pela região noroeste da Grande São Paulo, até o município de Jundiaí.

Tabela 2 – Distância entre estações da linha 1 - Azul

Fonte: Extraído de (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013)

Trecho	Distância (em metros)
Jabaquara - Conceição	1.183
Conceição - S. Judas	1.096
S. Judas - Saúde	790
Saúde - Pça. Da Árvore	896
Pça. Da Árvore - S. Cruz	1.312
S. Cruz - V. Mariana	1.138
V. Mariana - Ana Rosa	973
Ana Rosa - Paraíso	702
Paraíso - Vergueiro	683
Vergueiro - S. Joaquim	843
S. Joaquim - Liberdade	825
Liberdade - Sé	544
Sé - S. Bento	726
S. Bento - Luz	853
Luz - Tiradentes	658
Tiradentes - Armênia	691
Armênia - Tietê	1.245
Tietê - Carandiru	760
Carandiru - Santana	740
Santana - Jd. S. Paulo	1.474
Jd. S. Paulo - Parada Inglesa	1.057
Parada Inglesa - Tucuruvi	992
TOTAL	20.181

A linha 3 - Vermelha, por sua vez, teve sua operação iniciada em 1979. Se estendendo por 22 km, é composta por 18 estações (a distância entre estações é apresentada na tabela 3) e liga a região oeste da cidade, a partir da estação Barra Funda, com a zona leste da cidade, através da estação Corinthians-Itaquera, cruzando a região central. Além de ser a linha mais extensa em atividade, é a que transporta o maior volume de passageiros, atendendo em média 1,190 milhão de passageiros por dia. É interligada à linha 1 - Azul a partir da estação Sé e com a linha 4 - Amarela, a partir da estação República. Também possui um terminal rodoviário, homônimo, na estação Barra Funda, além de ligações com estações ferroviárias das linhas 7 - Rubi e 8 - Diamante (esta linha direcionada a região oeste da cidade e municípios adiante), na estação Barra Funda, linha 10 - Turquesa, na estação Brás, linhas 11 - Coral e 12 - Safira (esta também atendendo a região da Zona Leste Paulista e municípios contíguos) nas estações Brás e Tatuapé, e ainda é ligada à

linha 11 - Coral na estação Corinthians-Itaquera.

Tabela 3 – Distância entre estações da linha 3 - Vermelha

Fonte: Extraído de (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013)

Trecho	Distância (em metros)
Itaquera - Artur Alvim	1.461
Artur Alvim - Patriarca	2.109
Patriarca - Guilhermina	1.722
Guilhermina - V. Matilde	1.534
V. Matilde - Penha	1.183
Penha - Carrão	2.280
Carrão - Tatuapé	1.280
Tatuapé - Belém	1.427
Belém - Bresser	1.825
Bresser - Brás	873
Brás - Pedro II	1.044
Pedro II - Sé	727
Sé - Anhangabaú	688
Anhangabaú - República	641
República - S. Cecília	772
S. Cecília - Mal. Deodoro	926
Mal. Deodoro - Barra Funda	1.544
TOTAL	22.036

Há também a linha 2 - Verde, que iniciou sua operação em 1991 e se estende por 14,7 km (a distância entre estações é representada pela tabela 4). Em sua configuração inicial, ia da estação Vila Matilde até a estação Ana Rosa, abarcando toda a extensão da Av. Paulista, uma das principais avenidas e centros econômicos da cidade. Sua configuração atual, com a inclusão das novas estações e indo até a estação Vila Prudente, se fez entre os anos de 2006 e 2010. Assim, a linha Verde atualmente se estende da Zona Oeste até a Zona Leste da cidade de São Paulo. Como mencionado anteriormente, conecta-se a linha 1 - Azul por meio das estações Ana Rosa e Paraíso, além de se conectar com a linha 4 - Amarela na estação Paulista, a partir da estação Consolação. Também possui uma conexão com a linha ferroviária 10 - Turquesa, na estação Tamanduateí. Está prevista para breve a inauguração de uma linha de monotrilho que se estenderá, a partir da estação Vila Prudente até a região de Cidade Tiradentes, no extremo leste da cidade de São Paulo¹.

¹Foi feita a menção a esta extensão porque, apesar de ainda não estar em operação, seu início é previsto para os próximos meses.

Tabela 4 – Distância entre estações da linha 2 - Verde

Fonte: Extraído de (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013)

Trecho	Distância (em metros)
V. Prudente - Tamanduateí	1.281
Tamanduateí - Sacomã	1.697
Sacomã - Alto do Ipiranga	981
Alto do Ipiranga - Imigrantes	1.121
Imigrantes - Chácara Klabin	1.119
Chácara Klabin - Ana Rosa	1.526
Ana Rosa - Paraíso	706
Paraíso - Brigadeiro	1.015
Brigadeiro - Trianon MASP	954
Trianon MASP - Consolação	982
Consolação - Clínicas	1.063
Clínicas - Sumaré	769
Sumaré - V. Madalena	1.489
TOTAL	14.703

Já a linha 5 - Lilás está localizada na zona Sul da cidade de São Paulo, se estendendo por 6 km, da estação Capão Redondo até a estação Adolfo Pinheiro. Foi inaugurada em 2010 e não possui ligação direta com nenhuma das demais linhas de Metrô atuais ². Possui uma conexão com a linha ferroviária 9 - Esmeralda na estação Santo Amaro, esta se estendendo por toda a Av. Nações Unidas, às margens do rio Pinheiros e próxima a importantes avenidas, como a Av. Luis Carlos Berrini, Av. Brigadeiro Faria Lima e Av. Rebouças.

Sendo a mais recente das linhas, com início das operações em 2010, a linha 4 - Amarela se estende por 11,3 km, indo da estação Luz, na região central, até a estação Butantã, na zona Oeste (a distância entre estações é apresentada na tabela 5)³. Possui conexão, conforme mencionado anteriormente, com a linha 1 - Azul, na estação Luz, com a linha 3 - Vermelha, na estação República, com a linha 2 - Verde na estação Paulista, onde se conecta com a estação Consolação. Ainda, possui ligação com as linhas ferroviárias 7 - Rubi, 10 - Turquesa e 11 - Coral na estação Luz e com a linha 9 - Esmeralda, na estação Pinheiros. Esta linha, diferente das outras, é operada pelo consórcio chamado

²Apesar de, no projeto, estar prevista uma conexão com a linha 1 - Azul na estação Santa Cruz

³Os dados constantes nesta tabela foram extraídos a partir da distância em linha reta entre os pontos referente às estações no mapa da cidade, pois não foi possível ter acesso a esta informação junto a empresa responsável: a linha é gerida por empresa privada, e, segundo consulta com ouvidoria da empresa, possui obrigações contratuais que a impede de disponibilizar a informação.

Via Quatro, gerido pela iniciativa privada, em regime de concessão.

Tabela 5 – Distância entre estações da linha 4 - Amarela

Trecho	Distância (em metros)
Luz - República	1.200
República - Paulista	2.300
Paulista - Faria Lima	3.600
Faria Lima - Pinheiros	1.000
Pinheiros - Butantã	850
TOTAL	8.950

4.1.2 Conceituando o Metrô de São Paulo - Aspectos do Sistema

Traçando um paralelo entre o sistema de Metrô de São Paulo e a abordagem proposta para o estudo de sistemas de transporte urbano feita em (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2007), identificamos como principais componentes as estações e as conexões entre estações de uma mesma linha.

As estações podem ser compreendidas como polos de concentração de usuários do sistema, seja pelos recursos que oferecem, como terminais rodoviários e terminais de ônibus urbanos, seja por estarem relacionados a importantes polos comerciais, como a Av. Paulista, ou mesmo por sua ligação a polos residenciais, como é o caso da região de Itaquera. Desta forma, as estações possuem as características dos nós, de acordo com a literatura apresentada no Capítulo 2 (RODRIGUE; COMTOIS; SLACK, 2007). Por sua vez, a conexão entre estações (nós), seja entre estações da mesma linha ou entre linhas diferentes, são ligações, de acordo com o mencionado por Rodrigue, Comtois e Slack (2007).

Sistemicamente, podemos então considerar cada uma das linhas de forma independente, com seus próprios parâmetros de funcionamento. De fato, cada uma das linhas pode possuir um número diferente de trens operando, com características diferentes (velocidade, capacidade, tamanho e tempo de parada), além de regras de funcionamento distintas.

Indo além, podemos identificar o relacionamento entre as distintas linhas, como o relacionamento existente com outros modais. Encapsulando as características de cada modo, que são pertinentes apenas a si, todos eles operam de forma independente, possuindo como única ligação, as respectivas conexões. Isto está presente na relação entre o Metrô e as linhas férreas, entre as linhas férreas e terminais de ônibus, entre estaciona-

mentos onde os usuários deixam seus veículos particulares e estações do Metrô, e assim por diante, o que representa, no fim, diversos sistemas formando o sistema de transporte urbano da cidade.

Desta forma, apesar do presente trabalho apresentar a implementação tomando como base apenas o Metrô, o modelo proposto leva em conta esta característica de conexão entre os diversos sistemas presentes no cenário urbano. E, sendo assim, cada linha será tratada como um sistema independente, apesar de apresentarem similaridades entre si.

Ainda, apesar do sistema ferroviário possuir características análogas ao Metrô, já que ambos são sistemas de transporte sobre trilhos e operam de forma similar (de fato, as principais diferenças estão no raio atendido, com o transporte ferroviário possuindo linhas mais longas e visando a atender, em geral, pontos mais afastados, seja bairros mais distantes ou mesmo outros municípios), o presente trabalho trata apenas do Metrô devido ao menor número de informações disponíveis sobre o fluxo de passageiros e operação do sistema ferroviário.

O Metrô de São Paulo possui uma vasta quantidade de informações sobre o fluxo de passageiros na forma da pesquisa Origem-Destino, realizada periodicamente, visando a identificar os principais fluxos de passageiros. Antecipando o tópico, que será tratado em detalhes adiante no presente trabalho, tal pesquisa foi usada para alimentar o modelo proposto e utilizá-lo para a verificação de seu funcionamento. Sendo esta então a motivação para a não inclusão do sistema ferroviário.

Outro ponto a ser observado é a opção pela não inclusão da linha 5 - Lilás, visto que a mesma encontra-se isolada do restante das linhas de metrô (possuindo conexão apenas com o sistema ferroviário) e, portanto, não representando informações diretamente relevantes para a validação da simulação.

4.2 O Framework

Esta seção apresenta o framework proposto. Serão discutidos a seguir a fundamentação e o processo de desenvolvimento do framework e do modelo proposto. Também serão apresentadas as interfaces, classes e respectivos métodos e propósitos de cada um dos itens, abordando principalmente seu papel dentro da simulação, como objeto Estrutural, Operacional e Populacional.

4.2.1 Fundamentação do Modelo

O modelo aqui proposto tem por objetivo permitir a construção de aplicações para a simulação de múltiplos modais de transporte de forma interligada, porém independente. Junto com o modelo, é descrito também um *framework* para a implementação de simulações utilizando este modelo.

Como ponto de partida para o desenvolvimento, foram considerados os aspectos teóricos expostos por Rodrigue, Comtois e Slack (2007) e discutida na fundamentação teórica deste trabalho. Ainda, foram consideradas as modelagens microscópica e mesoscópica, apresentadas no trabalho de Barceló (2010) e também discutidas na fundamentação teórica deste trabalho.

Fundamentalmente, o modelo em questão tem como princípio três categorias de objetos: Estruturais, Populacionais e Operacionais.

Os objetos Estruturais representam as estruturas físicas do sistema, ou mesmo representações lógicas de estruturas físicas, como por exemplo, uma região. Tomando como exemplo o sistema de transporte sobre trilhos, entram nessa categoria os objetos que representam as estações, conexões entre as estações (na linha), conexões entre linhas e filas de estações e conexões.

Objetos Populacionais são aqueles que representam o usuário e seus distintos comportamentos. Nessa categoria, além dos objetos referentes ao usuário em si, temos os mecanismos de decisão a ele atribuídos.

Por fim, os objetos Operacionais são aqueles referentes ao funcionamento do sistema, representando os veículos, suas respectivas regras de operação e características do sistema em questão. Novamente tomando como exemplo o sistema de transporte sobre trilhos, objetos desta categoria seriam os que representam os trens da linha e as configurações de sua operação para o contexto no qual ele se insere, como adistância mínima para o trem da frente, o tempo de parada em cada estação e a capacidade de absorção. Aqui também estão inseridas informações sobre a linha em si, como por exemplo, o número de trens operando simultaneamente.

Ainda, abarcando todas estas categorias, temos o sistema, com os objetos que representam as linhas, a configuração de tal ambiente, como por exemplo, conexões com outros sistemas (no caso, outras linhas) e, também, as mensagens para manipulação e operação do sistema em questão.

Então, traçando um paralelo com os aspectos teóricos apresentados, os objetos estruturais contém representações do modelo proposto por Rodrigue, Comtois e Slack (2007), enquanto os objetos populacionais e operacionais lidam diretamente com os aspectos de simulação apontados por Barceló (2010).

Observando a estrutura apresentada por Rodrigue, Comtois e Slack (2007), o sistema de transporte urbano pode ser tratado como um grafo, direcionado e com arestas com peso. Nesta configuração, os “Nós” são os vértices do grafo e as “Ligações” são as arestas. Ainda, tal grafo é direcionado, tendo cada aresta uma direção definida, sendo que, normalmente, há uma representação da direção contrária - representando o caminho de volta - através de outra aresta. Então, uma aresta pode representar, neste caso, uma ligação entre uma estação e outra (com o caminho inverso representado pela aresta na direção contrária), ou representar também uma rua de mão única (neste caso, com uma aresta ligando dois vértices com uma só direção).

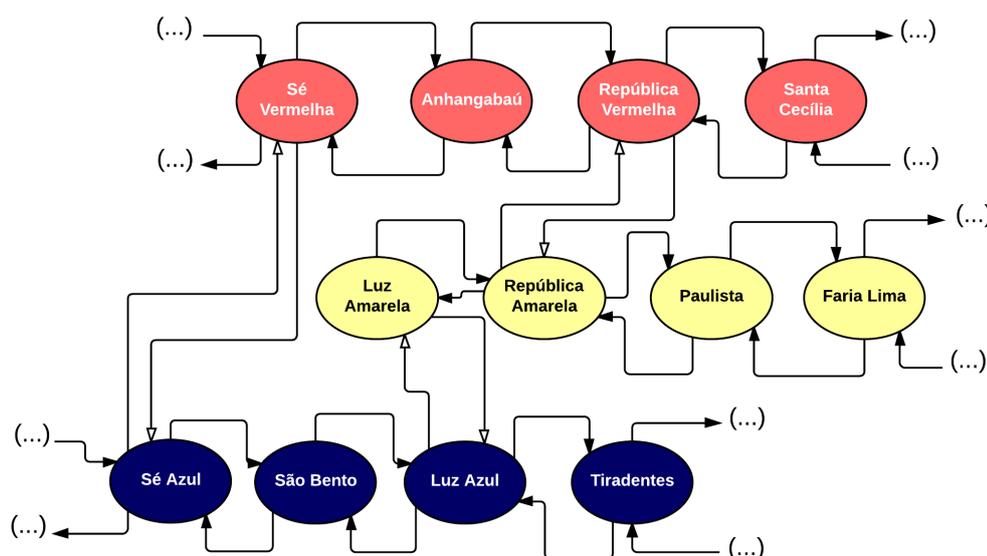
Para a definição dos pesos, utilizamos o conceito de Ciclo. Um Ciclo, em nosso contexto, é um valor utilizado para dois objetivos principais: permitir a sincronização entre diferentes modais, considerando que em um ciclo ocorre um conjunto discreto de ações (entre elas o deslocamento de um veículo, o embarque de um determinado número de passageiros, ou a movimentação destes por um determinado trecho); e permitir que se tenha uma unidade normalizada entre o deslocamento de usuários dentro do sistema, já que, caso fosse utilizado valores como velocidade em km/h, haveria discrepâncias de escala entre o valor do deslocamento a pé de um usuário (cerca de 6 km/h) e o deslocamento de um trem (cerca de 60 km/h), por exemplo. Ainda, o conceito de ciclo está mais próximo do conceito de tempo do que de distância percorrida, já que, para o usuário, é mais importante saber que fará o percurso no menor tempo possível, do que a distância neste percurso. O que é melhor: ir de **A** → **B** percorrendo 100km em 60 minutos ou ir de **A** → **B** percorrendo 50km em 90 minutos, considerando que outras variáveis, como custo e conforto são iguais?

Para cada sistema, dentro de um ciclo, ocorrem um conjunto de ações, definidas para o modal em questão. São exemplos de ações a movimentação de um trem por um determinado trecho, a parada em uma estação com a liberação (e entrada) de um conjunto de passageiros, entre outras, entre outras alterações de estado pertinentes ao sistema em questão. Cabe ressaltar que as ações em um ciclo foram estruturadas para permitir a execução de forma paralela, ou seja, podem fazer uso de múltiplas *threads*, já que estas ações dentro de um sistema são isoladas.

Sendo assim, o ciclo então serve para manter o sincronismo entre sistemas, delimitando as ações executadas, de forma a permitir a transição de passageiros entre os sistemas simulados. É importante, porém, não confundir o conceito com a variável tempo, já que, apesar da correlação, há outros fatores pertinentes ao ciclo que não são explícitos apenas pelo tempo.

A figura 10 contém a representação em grafo de parte do Metrô de São Paulo. Observe que cada aresta possui seu respectivo peso, não representado na figura (ainda sem a parametrização final). As setas pretas representam a ligação entre as estações através do tunel percorrido pelo trem, e as setas brancas as conexões entre as estações - (por exemplo, República, da linha Vermelha e República, da Linha Amarela), percorridas pelo usuário a pé. Os pesos, nesse caso, são definidos em ciclos, apresentando valores similares, por exemplo, entre o que o usuário leva para percorrer esta conexão e o que um trem leva para ir de uma estação a outra. Isto é importante, visto que há situações nas quais é melhor optar por uma rota direta do que fazer um caminho que, apesar de mais curto, exige um número maior de transferências e, portanto, pode levar mais tempo para ser percorrido.

Figura 10 – Representação simplificada do grafo referente ao Metrô de São Paulo - Trechos das linhas Azul, Vermelha e Amarela e suas conexões



A representação em grafos é importante também para uniformizar os sistemas envolvidos, permitindo que sejam feitas manipulações referentes a simulação como um

todo de maneira uniforme. Entre elas, temos a definição das rotas pelos usuários, que, pela estrutura de grafos, permite a utilização de algoritmos como o de Dijkstra para a definição dos caminhos. Isto, naturalmente, permite que a implementação de cada um dos sistemas seja feita de maneira independente, seja a utilização de autômatos celulares para transporte sobre trilhos, seja a utilização de agentes inteligentes para o transporte individual, contanto que a estrutura permita que o sistema seja enxergado como um grafo e que o conceito de ciclo seja respeitado.

A seguir, discorreremos sobre o *framework* construído, suas classes e interfaces criadas para a implementação dos modelos e seus respectivos papéis.

4.2.2 O framework

O framework foi desenvolvido de maneira incremental, em paralelo com o desenvolvimento da simulação (que será discutida posteriormente), considerando Metrô de São Paulo como cenário-modelo. Foram utilizados de Orientação a Objetos (OO) para ser modular e extensível. No desenvolvimento deste trabalho, foi utilizada a linguagem de programação Java, por sua popularidade e por nosso conhecimento prévio nesta linguagem, porém a implementação foi feita de maneira que a transcrição e adaptação para outras linguagens ocorra de maneira simples, evitando o uso de recursos específicos da linguagem, e fazendo uso de recursos comuns a linguagens orientadas a objetos sempre que possível.

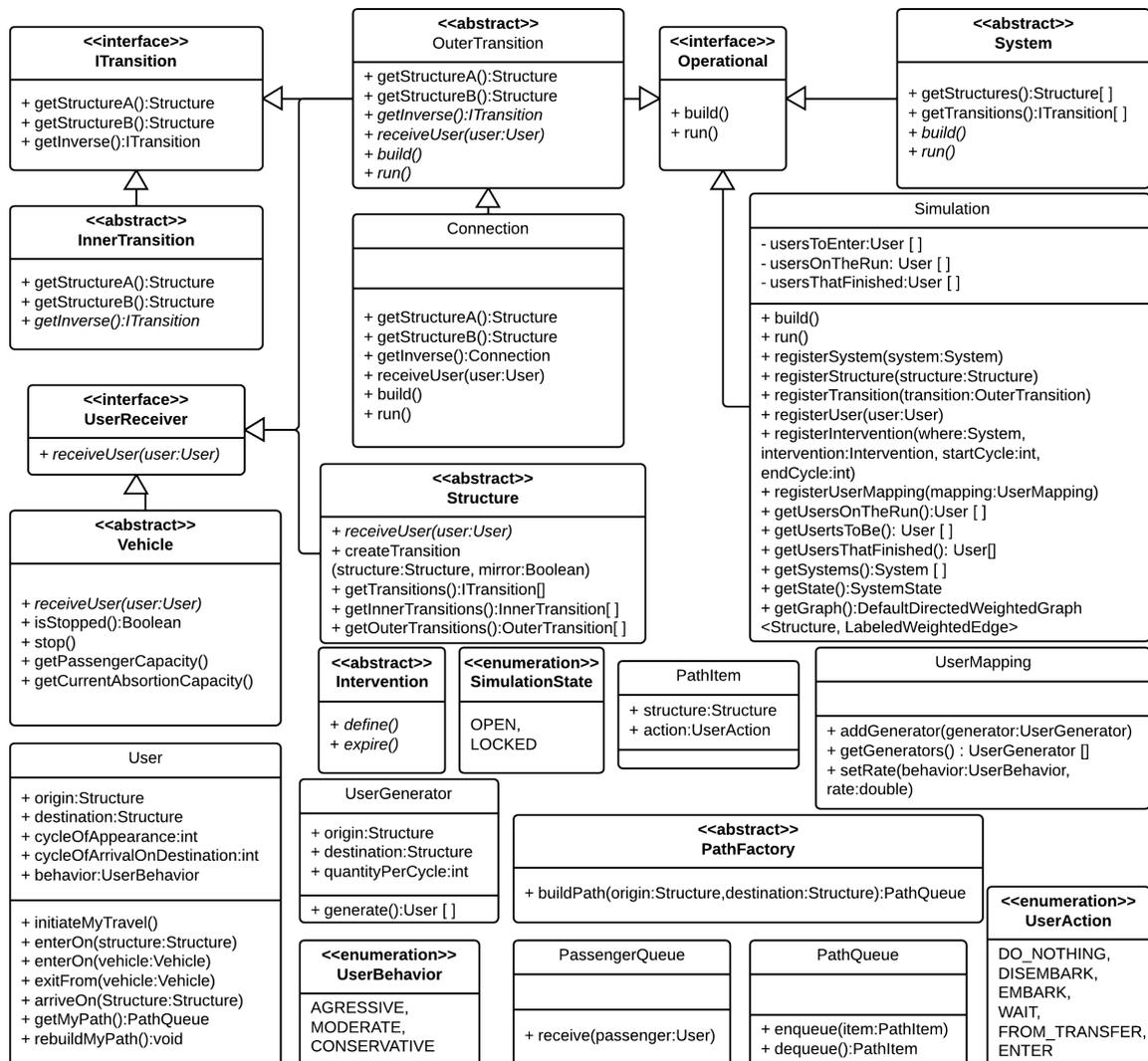
Desta forma, são responsabilidades do framework:

- Prover uma estrutura única para a implementação de diversos sistemas de transporte.
- Gerenciar a inserção e direcionamento de usuários na simulação.
- Promover a sincronização entre os diversos sistemas, a partir do mecanismo de ciclos.

O ponto de partida para a devida compreensão do framework é o diagrama de classes, apresentado na figura 11, o qual apresenta as classes e interfaces do framework. A seguir, discorreremos sobre as classes, interfaces e métodos disponíveis, apresentando seus papéis e objetivos na construção de uma simulação.

A interface *Operational* representa um elemento da simulação o qual está sujeito a uma ação de execução, ou seja, um objeto operacional, como por exemplo, uma linha de

Figura 11 – Diagrama de classes do modelo



trem dentro da simulação. Há dois métodos associados: *build()*, o qual é acionado na etapa inicial, de configuração; e *run()*, responsável pela implementação do comportamento da instância em questão com relação a execução da simulação. Esta interface é implementada pelas seguintes classes do framework: *Simulation*, *System* e *OuterTransition*.

A classe *Simulation* é a classe responsável pela configuração e execução da simulação em questão. Ela implementa a interface *Operational*, sendo assim, contém os métodos *build()* e *run()*. No caso do primeiro, além da configuração de parâmetros pertinentes à simulação em si, também encadeia a chamada ao método *build()* das classes *System* e *OuterTransition* a ela relacionadas. Além disso, esta classe possui os seguintes métodos:

- *registerSystem (system:System)*: Vincula um sistema à simulação. Esta chamada também varrerá todas as referências a transições do tipo *OuterTransition* e as referências a estruturas (que estendem *Structure*);
- *registerStructure (structure:Structure)*: Vincula uma estrutura à simulação. Apesar de ser possível realizar este vínculo de maneira isolada, é recomendável que a estrutura esteja vinculada a um sistema e que tal sistema seja vinculado à simulação;
- *registerTransition (transition:OuterTransition)*: Registra uma transição entre sistemas, ou seja, entre elementos que estendam a classe *OuterTransition*;
- *registerUser (user:User)*: Vincula um usuário à simulação, para que o mesmo seja inserido na simulação em seu respectivo ciclo. Seu uso é incomum, uma vez que geralmente o papel do registro do usuário caberá aos mapeamentos de usuário (*UserMapping*);
- *registerIntervention (intervention:Intervention, startCycle:int, endCycle:int)*: Registra uma intervenção que deve ocorrer na simulação, por exemplo, uma redução temporária de velocidade. Os parâmetros são a intervenção em si (detalhada adiante), o ciclo no qual ela será iniciada e o ciclo no qual ela deixará de valer, retornando o sistema para situação inicial;
- *registerUserMapping (userMapping:UserMapping)*: Registra um mapeamento de usuário para alimentação à simulação. Mais sobre a classe *UserMapping* será discutido adiante, durante a descrição dos usuários;
- *getState():SimulationState*: Retorna o estado atual da simulação. *SimulationState* é um numerador com dois estados: *OPEN*, que indica que a simulação está apta a receber alterações estruturais, como o acréscimo de novas linhas e o estado *CLOSED* indica que não podem ser feitas alterações estruturais, porém a simulação está apta para o início da execução;
- *getUsersToEnter():User[]*: Retorna uma lista de usuários que ainda não entraram na simulação;
- *getUsersOnTheGo():User[]*: Retorna uma lista dos usuários que estão se locomovendo pela simulação;
- *getUsersThatFinished():User[]*: Retorna uma lista dos usuários que já saíram da simulação;

- *getSystems(): System[]* : Retorna os sistemas registrados na simulação;
- *getGraph():DefaultDirectedWeightedGraph <Structure, LabeledWeightedEdge>*: Retorna a estrutura da simulação, em forma de grafo. O grafo utiliza a classe *DefaultDirectedWeightedGraph <Structure, LabeledWeightedEdge>*, da ferramenta de código aberto *JGraph / JGraphX*⁴.

É importante mencionar que os métodos de registro, ou seja, iniciados por *register*, só podem ser invocados quando a simulação está no estado *OPEN*. Caso sejam invocados quando a simulação está sendo executada, uma exceção é disparada.

Para a representação de um sistema, por exemplo, uma das linhas de metrô, tem-se a classe abstrata *System*. Ela implementa *Operational*, ou seja, também possui os métodos *build()* e *run()*. Tais métodos também são abstratos, sendo responsabilidade da classe filha sua adequada implementação. Há também métodos para a obtenção das estruturas (*getStructures() :Structure[]*) e transições (*getTransitions() :ITransition[]*) relacionadas ao sistema, estes com implementação padrão, podendo ser sobrescritos conforme a necessidade do desenvolvedor (estes são os métodos que serão verificados em *registerSystem (system:System)* de *Simulation*).

A interface *UserReceiver* é utilizada por todas as classes que podem receber usuários durante a execução e é implementada pelas classes *Structure*, *OuterTransition* e *Vehicle*. Ela exige a implementação do método *receiveUser (user:User)*. Este método representa a recepção do usuário pela instância em questão, sendo responsável pela alocação do usuário “dentro” do objeto em questão.

A seguir, temos a classe abstrata *Structure*, que representa uma estrutura cadastrada no sistema. Esta classe possui os seguintes métodos:

- *receiveUser (user:User)*: Método responsável pela recepção de um usuário na estrutura. Pode-se dizer que é algo análogo a porta de entrada desta estrutura, a partir da qual o usuário se encaminha para onde pode acessar o veículo necessário para seu deslocamento, por exemplo, a plataforma, no caso de uma estação;
- *createTransition (structure:Structure, mirror:Boolean)*: Cria uma transição entre a estrutura atual e a estrutura passada como parâmetro. O parâmetro *mirror* indica se a estrutura no sentido contrário também deve ser criada;

⁴<https://github.com/jgraph/jgraphx>

- *getTransitions() :ITransition[]*: Retorna uma lista com todas as transições disponíveis a partir desta estrutura, tanto internas quanto externas;
- *getInnerTransitions() :InnerTransition[]*: Retorna a lista de todas as transições internas desta estrutura (por exemplo, os túneis que conectam as estações mais próximas em um sentido e no outro, no caso do sistema de metrô);
- *getOuterTransitions() :OuterTransition[]*: Retorna todas as transições que ligam esta estrutura a outra estrutura, em outro sistema (por exemplo, a conexão entre as estações Paulista e Consolação do metrô de São Paulo).

A interface *ITransition* é utilizada por todas as classes que representam uma transição. Ela possui as operações *getStructureA() :Structure*, que retorna a estrutura vinculada em uma das pontas, *getStructureB() :Structure*, que retorna a estrutura vinculada na ponta oposta e *getInverse() :ITransition*, que retorna a transição espelho da transição em questão. Esta interface é implementada pelas classes *InnerTransition* e *OuterTransition*. Temos ainda o método *getCyclesToGoThrough():int*, que retorna o número de ciclos que um usuário leva para atravessar a transição em questão, método utilizado para a construção do grafo e, conseqüentemente, para a definição do custo do caminho.

A classe abstrata *InnerTransition* representa uma transição restrita ao sistema. Ela possui a implementação para os métodos *getStructureA() :Structure* e *getStructureB() :Structure*, porém tem o método *getInverse() :ITransition* como abstrato, uma vez que a lógica de inversão é diretamente afetada pela forma como a transição é implementada pela simulação em questão.

Já a classe abstrata *OuterTransition* representa uma transição envolvendo estruturas de dois sistemas distintos. Assim como *InnerTransition*, possui implementados os métodos *getStructureA():Structure* e *getStructureB() :Structure* e exige que o método *getInverse() :ITransition* seja implementado pela classe filha. Ainda, possui o método abstrato *receiveUser (user:User)*, oriundo da interface *UserReceiver*, que, assim como em *Structure*, é responsável pela recepção do usuário na transição. Por implementar a interface *Operational*, possui os métodos *build()* e *run()*, porém os mesmos também são declarados como abstratos, sendo necessária sua implementação pela classe filha.

Estendendo *OuterTransition*, há a classe *Connection*, que representa uma das possibilidades de implementação de conexão entre duas estruturas de sistemas diferentes. Neste caso, uma *Connection* é uma transição implementada com uma fila de usuários e com um temporizador em ciclos para a liberação do usuário. O método *receiveUser*

(*user:User*) insere o usuário na fila e atribui um contador com o valor zero. Assim, o método *run()* funciona da seguinte maneira: a cada ciclo (ou seja, cada vez que é invocado), o contador de cada usuário é incrementado em um, até que atinja o número de ciclos da transição e, assim, libere o usuário para sair, disparando uma mensagem para o usuário em questão, para que o mesmo entre na estrutura localizada na outra ponta. No caso desta transição, não é implementada nenhuma operação especial para o método *build()*, exceto a inicialização das respectivas filas (de ida e de volta).

Para a representação de veículos, temos a classe abstrata *Vehicle*. Ela possui três métodos: *receiveUser (user:User)*, para a representação da recepção do usuário pelo veículo, o qual é acionado quando o usuário entra no veículo - a partir da chamada do método *enterOn (vehicle:Vehicle)* (mais sobre este método será apresentado adiante). O método *stop()* é acionado quando o veículo interrompe seu movimento por algum motivo. Possui uma implementação padrão, a qual apenas muda o marcador de status da instância e, em geral, deve ser estendido para se adequar ao veículo que se deseja representar. Indicando o status do veículo, há o método *isStopped() :Boolean*, que retorna um valor booleano indicando se o veículo encontra-se ou não parado.

A classe *User* é utilizada para a representação do usuário. Adiante será discutida a dinâmica do funcionamento do usuário mas, pelo momento, vamos apresentar os métodos e propriedades a ele pertinentes:

- *Origin:Structure*: A estrutura de partida do usuário;
- *Destination:Structure*: A estrutura de destino do usuário;
- *cycleOfAppearance:int*: O ciclo no qual o usuário entrou no sistema;
- *cycleOfArrivalOnDestination:int*: O ciclo no qual o usuário atingiu seu destino;
- *enterOn (structure:Structure)*: Este método é acionado quando o usuário deve entrar em uma estrutura. A chamada deste método implica na chamada do método *receiveUser(user:User)* da estrutura em questão;
- *enterOn (vehicle:Vehicle)*: Este método é acionado quando o usuário deve embarcar no veículo passado como parâmetro, internamente há a invocação do método *receiveUser(user:User)* do veículo em questão;
- *exitFrom()*: Este método representa a ação de desembarque do veículo no qual o usuário está embarcado. Caso o usuário não esteja embarcado em nenhum veículo, uma exceção é disparada;

- *arriveOn (structure:Structure)*: Acionado por um veículo quando o mesmo chega em alguma estrutura, a ideia deste método é a mesma da notificação do condutor, que anuncia o nome da estação quando um trem nela. Neste método, a partir do caminho escolhido (e do tempo transcorrido), o usuário toma a decisão sobre o seu passo a seguir, a partir do conjunto de ações definidos pelo enumerador *UserAction*;
- *getMyPath() :PathQueue*: Retorna o caminho restante do usuário.

Há uma *factory* denominada *PathFactory*, a qual possui um método, *buildPath (origin:Structure,destination:Structure):PathQueue*, que recebe como parâmetros as estruturas de origem e destino do usuário e retorna uma fila (*PathQueue*) com os passos a serem seguidos dentro do grafo da simulação, para que o usuário chegue ao destino.

PathQueue é uma fila de itens *PathItem*, que por sua vez são combinações de estruturas e ações, representando um passo que o usuário deve tomar para chegar ao seu destino. As ações são definidas pelo enumerador *UserAction*, o qual possui os seguintes valores e significados:

- *DONOTHING*: O usuário não deve realizar nenhuma ação ao chegar na respectiva estrutura;
- *DISEMBARK*: O usuário deve desembarcar do veículo no qual se encontra ao chegar na estrutura;
- *EMBARK*: O usuário deve entrar na fila de embarque para algum veículo quando chegar na estrutura;
- *WAIT*: O usuário deve aguardar alguma mensagem antes de seguir para o próximo passo;
- *ENTER*: O usuário deve entrar na estrutura em questão;
- *FROMTRANSFER*: O usuário chegou em uma transição do tipo *OuterTransition* e deve entrar na estrutura. Em essência, tem o mesmo efeito de *ENTER*, servindo apenas para denotar a origem da ação;

Um *PathItem* possui duas propriedades: *structure:Structure*, representando a estrutura relativa ao passo em questão, e *action:UserAction*, representando a ação do usuário em relação a estrutura em questão. Sendo assim, *PathQueue* é uma fila destes registros

e possui dois métodos: *enqueue(item:PathItem)*, para inserção do registro em questão na fila, e *dequeue():PathItem*, para a recuperação do item da fila.

Por fim, a classe *PassengerQueue* corresponde a uma fila de passageiros ou usuários dentro de uma estrutura. O objetivo desta classe é representar, por exemplo, plataformas de estações, onde usuários aguardam a chegada do trem. Possui os métodos *receive (passenger:User)*, para a representação da entrada do passageiro na fila, *getPassengersNumber():Integer*, o qual retorna o número de passageiros na fila e *getPassengers():TuplejPassenger,Integer*, que retorna uma lista com os passageiros que estão aguardando na fila e seus respectivos tempo de espera (em ciclos). A coleta dos usuários da fila é de responsabilidade da estrutura em questão, de acordo com a regra desenvolvida. Ainda, caso o desenvolvedor julgue necessário, é possível estender esta classe para criação de outros mecanismos de gerenciamento da fila.

Sobre a geração de usuários, existem as classes *UserMapping* e *UserGenerator*. *UserGenerator* é uma classe na qual é indicada a relação entre estruturas de origem e destino e a quantidade de usuários gerados por ciclo, a partir do método *generate():User[]*. Também possui o método *setRate(behavior :Behavior, rate :double)*, que define a taxa de geração de usuários para um determinado comportamento.

Naturalmente, é possível estender esta classe, caso o desenvolvedor julgue necessário, bastando ter cuidado em fornecer uma implementação para o método *generate()* que seja consistente, visto que ele é fundamental. A classe *UserMapping* nada mais é que uma coleção de chaves e valores, onde a chave é a estrutura de origem e o valor é um arranjo de *UserGenerator*, com os usuários a serem gerados por ciclo e seus respectivos destinos.

Durante a execução, o framework permite que determinadas intervenções ocorram na simulação do sistema, como por exemplo, a redução da velocidade de uma linha devido a uma condição externa. Isto ocorre através das chamadas intervenções, representadas pela classe abstrata *Intervention*, a qual deve ser implementada para os sistemas que permitam este tipo de ação. Esta classe possui dois métodos: *define()* e *expire()*. Uma intervenção pode atingir qualquer componente da simulação, cabendo ao desenvolvedor a implementação dos respectivos métodos de definição e expiração da intervenção desejada.

Por fim, todas as instâncias possuem um identificador único do tipo *Global Unique Identifier*, no formato hexadecimal, que deve ser atribuído quando da chamada do construtor. Este identificador é usado internamente, para o controle e indexação dos objetos. Também, todos os comparadores destas instâncias, ou seja, as chamadas aos métodos

equals devem usar estes valores para comparação. O objetivo deste identificador único é permitir uma melhora substancial no desempenho, tendo em vista que um grande número de operações na aplicação dependem desse comparador aplicado ao identificador.

4.2.3 O funcionamento e utilização do *framework*

Esta seção descreve o funcionamento e a utilização do framework, com base na exposição de funcionalidades já realizada.

A utilização do framework parte da configuração do ambiente. Para isso, é preciso que seja feita a montagem do sistema em questão, criando as estruturas e transições internas necessárias, para todos os sistemas a serem simulados. Por exemplo, no caso do metrô de São Paulo, na forma de trabalho conforme sugerido anteriormente, primeiro todas as estruturas referentes às estações de uma linha são instanciadas, assim como são criadas as transições referentes aos túneis. Isto é feito instanciando uma estrutura e então adicionando a ela suas respectivas transições (através do método *createTransition(structure:Structure, mirror:Boolean)*). Neste ponto, tem-se um grafo representando o sistema em questão, mas sem a conexão com outros sistemas.

Então, o sistema deve ser registrado na simulação. Isto é feito a partir do método *registerSystem(system:System)*. Uma vez registrado, então é possível adicionar conexões com outros sistemas registrados, a partir do método *registerTransition(transition:OuterTransition)*. Desta forma, o sistema será capaz de trabalhar com um grafo único, envolvendo os diversos sistemas registrados.

A seguir, são feitas as criações das intervenções as quais deseja-se que cada um dos sistemas sofra durante a simulação. Isto é feito por meio da criação de instâncias das intervenções que irão ocorrer e da chamada ao método *registerIntervention(intervention:Intervention, startCycle:int, endCycle:int)*, a intervenção em si, seu ciclo de início e de encerramento.

Concomitantemente a definição das intervenções, deve ser feito o mapeamento da geração de usuários. O primeiro passo é a definição dos mapeamentos e seus respectivos geradores (*UserGenerator*). Um gerador é definido por uma estrutura de origem, uma estrutura de destino e um valor inteiro com a quantidade de usuários gerados por ciclo. A criação das instâncias é feita pelo método *generate():User[]*. Em seguida, este gerador deve ser vinculado a um mapeamento (*UserMapping*). Um mapeamento é um conjunto chave-valor, no qual a chave é uma estrutura e o valor é um arranjo, com todos os geradores

pertinentes àquele mapeamento. Ainda, um mapeamento possui um ciclo de início e um de término (de maneira semelhante às intervenções), indicando a validade daquele gerador. Para cada usuário gerado é definido o caminho básico, com base no grafo gerado a partir das estruturas e conexões disponíveis (com o número de ciclos que leva para cruzá-las, por padrão). A cada ciclo, dependendo do perfil do usuário definido, o caminho pode ser recalculado.

Uma vez concluída a etapa de definição da simulação, o método *build()* deve ser invocado. Seu efeito é cascatear tal chamada para todos os objetos que herdam de *Operational*, exceto *Simulation*. Isto é, as transições do tipo *OuterTransition* e sistemas (que herdam de *System*). Além da criação das estruturas, são gerados os usuários que irão percorrer a simulação, com a criação de suas respectivas rotas e ciclo de entrada na simulação.

Assim, a simulação está pronta para ser executada. Isto é feito com a chamada do método *run()*. O algoritmo 2 apresenta o passo-a-passo da execução da simulação.

Então, a execução da simulação possui quatro etapas:

1. Inserção dos usuários dentro da simulação.
2. Verificação das intervenções que devem ocorrer no sistema.
3. Revisão dos caminhos dos usuários a partir da condição atual do sistema e do perfil do usuário.
4. Execução do ciclo para cada um dos sistemas utilizados e grava os respectivos logs das estruturas e veículos registrados na simulação.

A seguir, serão feitas algumas considerações a respeito da extensão do framework para diversos modais.

4.2.4 Estendendo o Framework

O framework permite trabalhar com múltiplos modais, contanto que os pontos de conexões entre estes modais sejam bem definidos. Assim, o framework consegue identificar e abstrair cada um destes modais em uma estrutura única, em um grafo, no qual o usuário conseguirá identificar sua rota.

Assim, o trabalho de extensão consiste em:

Entrada: A simulação *Simulation*

```

1 currentCycle ← 0;
2 enquanto currentCycle < simulation.Duration faça
3   para cada userMapping ∈ Simulation.getUserMappings(), onde para cada
   userMapping : UserMapping, userMapping.startCycle ≤
   currentCycle AND userMapping.endCycle < currentCycle hacer
4     para cada userGenerator ∈ userMapping.getGenerators() hacer
5       Simulation.registerUsers(userGenerator.generate())
6   para cada user ∈ Simulation.getUsersToBe(), em que para cada
   user : User, user.cycleOfAppearance == currentCycle hacer
7     user.initiateMyTravel() usersOnTheRun.add(user)
     usersToBe.remove(user)
8   para cada intervention ∈ S.getInterventionsToBegin(currentCycle) hacer
9     intervention.define()
10  para cada intervention ∈ S.getInterventionsToEnd(currentCycle) hacer
11    intervention.expire()
12  para cada user ∈ S.getUsersOnTheRun() hacer
13    se user.Behavior == UserBehavior.AGRESSIVE então
14      user.recalculateMyPath()
15    se user.Behavior == UserBehavior.MODERATE então
16      shouldRecalculatePath ← Valor booleano indicando que deve
      recalculer o caminho, com base na chance definida na configuração da
      simulação
17      se shouldRecalculatePath então
18        user.recalculateMyPath()
19  para cada system ∈ S.getSystems() hacer
20    Executa o método run() de cada um dos sistemas, utilizando a
    implementação específica de cada modelo system.run()
21  para cada structure ∈ S.getSystems() hacer
22    Grava o log para a estrutura structure.writeLog()
23  para cada vehicle ∈ S.getActiveVehicles() hacer
24    Grava o log para os veículos em deslocamento vehicle.writeLog()

```

Algoritmo 1: O funcionamento do método *run()* da classe *Simulation*

- Estender a classe *System* para o modal desejado.
- Implementar os métodos *run()* e *setup()* do modal em questão, observando em *run()* que sua chamada equivale às ações em um ciclo.
- Estender a classe *Structure* para representar as estruturas referentes ao modal em questão.

- Extender a classe *InnerTransition* para representar as transições entre estruturas dentro do modal em questão.
- Extender a classe *Vehicle* para a representação dos veículos do modal em questão.

Ainda, apesar de haver uma implementação básica da conexão entre dois modais, na forma da classe *Connection*, dependendo do cenário, pode ser necessário algum outro tipo de gerenciamento e conexão entre sistemas. Isto é possível, bastando que o desenvolvedor estenda a classe *OuterConnection*.

Vale ainda ressaltar que qualquer elemento pode ser estendido e feita uma implementação própria, bastando que a estrutura do framework seja respeitada. Por exemplo, caso seja necessária a implementação de algum funcionamento novo com relação ao usuário, basta que se estenda a classe *User*, com a implementação desejada, reescrevendo os métodos quando aplicável, e trabalhando na configuração do framework com a tipificação das classes pai (por exemplo, as classes de registro trabalharão como *User*, mas a implementação será a definida pela classe filha, nos métodos sobrescritos).

4.2.5 O Usuário

O funcionamento do usuário parte do mecanismo de agentes inteligentes reativos, partindo do conceito apresentado por Wooldridge (2002), onde um agente inteligente é um agente que, dado um estímulo ou situação, analisa os dados do cenário em questão e produz uma determinada resposta. Para todos os efeitos, um usuário é um agente inteligente, o qual reage a estímulos (eventos) ou que, dada uma determinada condição, executa uma determinada ação.

Um estímulo é, por exemplo, o que ocorre quando um veículo chega em uma determinada estrutura e dispara o evento *arriveOn (structure:Structure)* para todos os usuários que nele estão, fazendo com que cada um deles tenha uma determinada ação de acordo com sua rota planejada - que pode ser desembarcar ou continuar no veículo, recalculando sua possível rota de acordo com o seu conhecimento sobre o cenário, entre outras ações possíveis.

Em sua forma básica, levando em conta a simulação de sistemas de transporte, o usuário pode:

- Entrar ou sair de um veículo;

- Entrar ou sair de uma estrutura;
- Entrar ou sair de uma conexão;
- Alterar o seu caminho, de acordo com informações como, por exemplo, interrupção de um determinado trecho.

Ainda, dentro de cada sistema, um usuário pode ter comportamentos específicos, definidos pela implementação feita pelo desenvolvedor. De fato, tal implementação pode ser vista, por exemplo, na classe *Connection* que, apesar de simples, com o deslocamento do usuário sendo representado por uma adaptação do mecanismo de fila de prioridade, apresenta um comportamento e tratamento próprio para o usuário, respeitando o que foi definido pelo modelo, sem, no entanto causar impacto na implementação de outros sistemas.

Para a definição do seu comportamento dentro do sistema, o usuário pode ter três tipos de comportamento, os quais indicam a frequência na qual o usuário altera a sua rota. São eles:

- **Agressivo:** O usuário certamente tentará recalculer a sua rota, se o número de ciclos estimado para a chegada ao seu destino for maior do que o esperado - ele consegue saber sempre qual o melhor caminho no presente momento.
- **Moderado:** O usuário poderá recalculer a sua rota se o número de ciclos estimado para a chegada ao seu destino for maior do que o esperado, com base em uma probabilidade definida na configuração da simulação - ele consegue saber sempre qual o melhor caminho no presente momento.
- **Conservador:** O usuário não alterará o seu caminho, a não ser que haja alguma interrupção na sua rota. A escolha de rota é feita na entrada do usuário na simulação, considerando o melhor caminho no momento.

Sendo assim, na configuração do sistema, também é definida uma chance do aparecimento de cada um dos perfis, que serão sorteados a partir dos usuários registrados no gerador. A representação é feita a partir do enumerador *UserBehavior*, com os valores *AGRESSIVE*, *CONSERVATIVE* e *MODERATE*.

O mecanismo de representação de usuários também prevê a utilização de grupos de usuários ao invés de indivíduos, ou seja, cada instância pode representar qualquer

número de indivíduos, os quais poderão ser decompostos dentro de cada um dos sistemas, quando pertinente. Assim, temos no framework a possibilidade de trabalhar com simulações microscópicas e mesoscópicas e, em algum nível, com simulações macroscópicas, desde que se forneça a implementação adequada da simulação, com a respectivas entradas e saídas de usuários, para o sistema em questão.

As rotas são construídas a partir de algoritmos para roteamento em grafos já conhecidos, como Dijkstra, por exemplo, observando as definições de peso feitas para cada um dos sistemas em questão. A visualização da estrutura na forma de grafos, como mencionado anteriormente, é responsabilidade da classe *Simulation*.

O tratamento do comportamento aqui apresentado é a implementação padrão feita pelo modelo aqui proposto. Todavia, tal modelo pode ser estendido para o acréscimo de novos comportamentos, mais adequados ao cenário estudado, como por exemplo, o tratamento de outras variáveis, como custo, conforto, entre outras, discutidas amplamente na fundamentação teórica deste trabalho.

Na próxima seção, será discutida a implementação da simulação do sistema de metrô utilizando o framework. Serão apresentados detalhes sobre a implementação de um modal e como deve ser feita a montagem e execução da simulação.

4.3 A Simulação - Modelagem e Implementação

Esta seção descreve como foi feita a implementação da simulação para transporte sobre trilhos, no cenário escolhido, fazendo uso do framework especificado. Primeiro será discutida a implementação da linha, utilizando autômatos celulares. A seguir, será exposta a implementação do comportamento do usuário, utilizando o framework, com sua abordagem orientada a eventos, cuja arquitetura está baseada em agentes inteligentes.

4.3.1 A Linha

Para a modelagem e construção do cenário, é necessário representar os seguintes componentes: Linhas, Trens, Estações e Conexões. Uma linha possui uma estação de origem e uma estação de destino e, neste intervalo, uma série de paradas em estações. Também, numa linha há dois segmentos, um indo da estação de origem à estação de destino e o outro fazendo o caminho inverso.

Deslocando-se neste cenário e responsáveis por transportar os passageiros, temos

os trens. Eles param em cada uma das estações por um determinado tempo, possuem uma capacidade de absorção e liberação de usuários e também uma lotação máxima. Seu deslocamento é definido pela sua velocidade (em geral, similar a todos os outros trens no mesmo sentido da linha) e também pela posição relativa ao trem imediatamente a sua frente, resguardando uma distância mínima entre trens. Quando um trem chega ao fim da linha, ele então ou muda de sentido na linha, ou é recolhido para a garagem (quando aplicável).

A estação é um concentrador de usuários, tendo em vista que é por ela que os usuários entram e saem do sistema e aguardam os trens que permitirão a realização do deslocamento. Uma estação possui duas plataformas, cada qual sendo um ponto de parada para um dos sentidos (estações terminais possuem as duas plataformas, porém quando a plataforma é a estação terminal de um dado sentido, seu papel é apenas para desembarque). Sendo assim, pode-se considerar uma plataforma como uma fila de embarque para o trem.

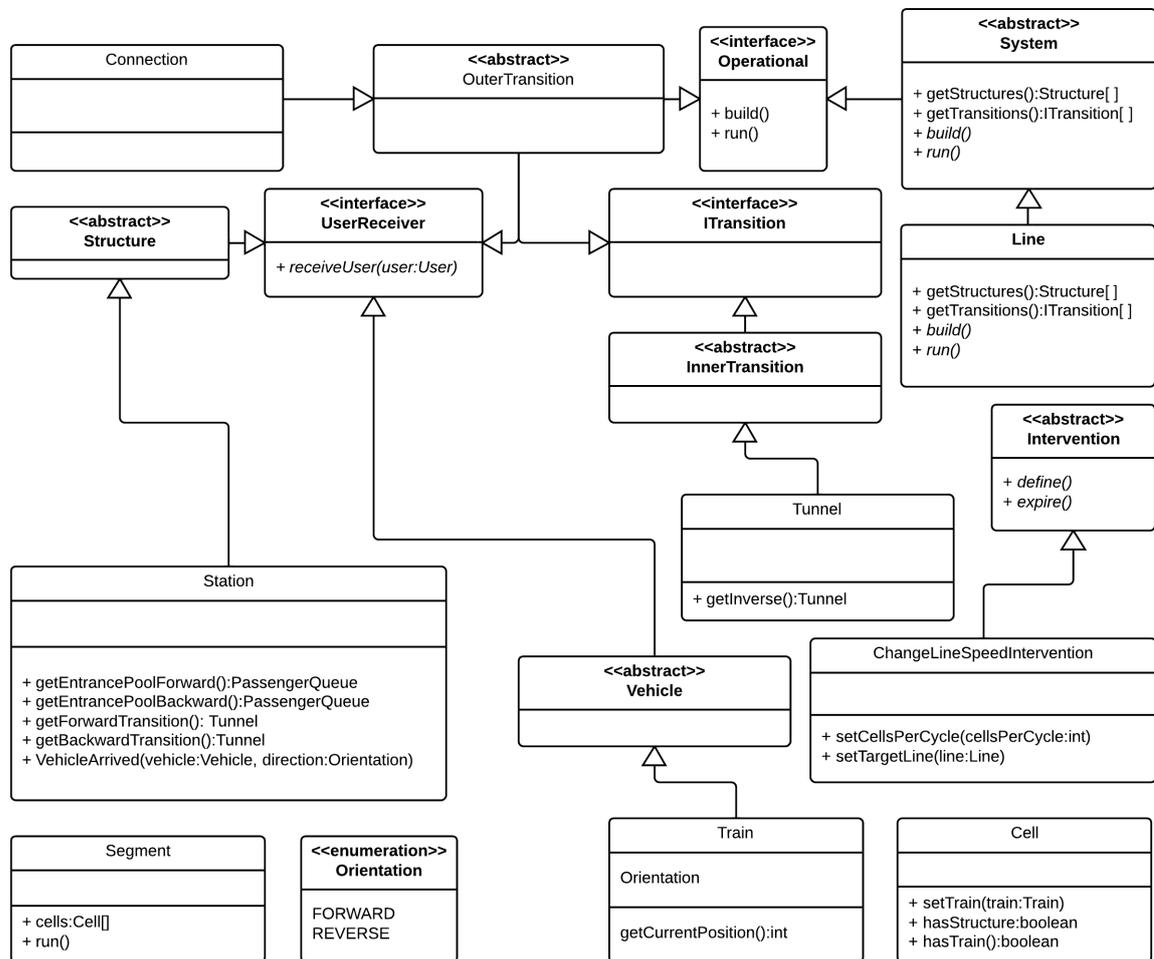
As conexões são ligações entre as linhas disponíveis, ou com uma linha e algum outro sistema de transporte. Para o nosso cenário, elas aparecerão como ligações entre duas estações, cada qual de uma linha (por exemplo, em nosso modelo, dividimos a estação Sé em duas: Uma para a linha Vermelha e uma para a linha Azul).

Tendo isso em vista, a implementação do modal de transporte sobre trilhos consiste na especialização das classes de componentes. Tem-se assim as classes *Line*, que estende a classe *System*, *Station* que estende *Structure*, *Tunnel* e *Connection*, que estendem *InnerTransition* e *IOuterTransition*, respectivamente (ambas, naturalmente, implementam a interface *ITransition*). A figura 12 apresenta o diagrama de classes das extensões do framework para este modal.

A classe *Line* representa a linha a ser simulada. Ela é responsável não só por conter o grafo que representa a linha, mas também pelas chamadas para a construção da linha como uma estrutura celular (o que é feito na chamada ao método *build()*) e, também, pelo gerenciamento da movimentação dos trens.

Já *Station*, por sua vez, representa uma estação da linha. Nela constam duas filas (as quais estendem *PassengerQueue*), uma para cada sentido. Elas são responsáveis por receber e gerenciar os usuários que nelas chegam (esta parte da simulação está vinculada ao sistema de gerenciamento e deslocamento de usuários exposto anteriormente). Possui, dentre suas principais características o comprimento, definido em número de células, **C(station)** o qual, inclusive, pode ser padronizado entre todas as estações da linha já

Figura 12 – Diagrama de classes da implementação



que normalmente tal característica é compartilhada por todas as estações de uma linha. É importante ressaltar que a entrada de passageiros em uma estação é feita a partir do método `receivePassenger(passenger:User)`.

As classes `Tunnel` e `Connection` ambas implementam `ITransition`, já que ambas representam conexões entre elementos da simulação.

`Tunnel` representa um determinado segmento do túnel o qual liga duas estações e, portanto, uma conexão pertinente e acessível apenas à linha em questão, sem entrada e saída de passageiros (sendo feita apenas pelo trem em questão). Entre as principais características, temos seu comprimento em células, denotado por **C(tunnel)** e obtido através do método `getCellLength():int` e o número de ciclos, que um trem demora para atravessá-lo, através do método `getCyclesToGoThrough():int`, sobrescrevendo o método

presente em *Transition*. O número de ciclos pode ser redefinido durante a simulação, defido a alguma alteração de condições da linha.

Por sua vez, *Connection* representa a conexão desta linha com outra linha ou outro componente da simulação alheio a linha em questão, sendo que, neste caso, utilizamos a implementação do framework, a qual fornece uma fila com um temporizador (em ciclos), para indicar quando um determinado usuário pode ser liberado - similar a estrutura de uma fila de prioridades.

Assim, há duas representações para uma linha: a representação na forma de grafo, utilizada principalmente para a determinação das rotas pelo usuário dentro do sistema de transporte e a representação através de uma estrutura de autômatos celulares, interna a linha e utilizada no funcionamento interno da mesma.

Esta representação utiliza o mecanismo de autômatos celulares para a representação do deslocamento dos trens. Esta decisão foi tomada devido à similaridade entre cenários encontrados na revisão sistemática realizada (MORAIS; DIGIAMPIETRI, 2012) e ao sistema de transporte sobre trilhos possuir um ambiente controlado, no qual há uma central de controle, responsável pela coordenação do deslocamento dos trens e, portanto, responsável por definir a velocidade dos trens, tempo de parada nas estações, número de trens simultâneos na linha, entre outros parâmetros pertinentes ao cenário. O papel deste controlador, em nossa simulação, é assumido pela linha.

Uma linha de trens possui como característica um sentido único de deslocamento, com trajeto completamente definido e sem possibilidade de ultrapassagens, o que serve por caracterizar como um autômato unidimensional. Isto reforça a simplicidade de implementação, diferindo por exemplo da aplicação para a simulação de automóveis observadas na revisão apresentada no Capítulo 3, utilizando autômatos celulares de várias dimensões ou agentes inteligentes.

Cada linha possui dois segmentos, de ida e volta, cada qual com $\mathbf{C}(\mathbf{S})$ células e uma série de parâmetros, de forma a representar dados oriundos da central de controle da linha. Então, como parâmetros de uma linha (\mathbf{L}), temos:

- Número de trens operando simultaneamente – $\mathbf{N}(\mathbf{L})$: O número de trens que estarão ativos na linha simultaneamente.
- Tempo de parada – $\mathbf{T}_p(\mathbf{L})$: O número de ciclos que um determinado trem fica estacionado em uma determinada estação para embarque e desembarque de passageiros.

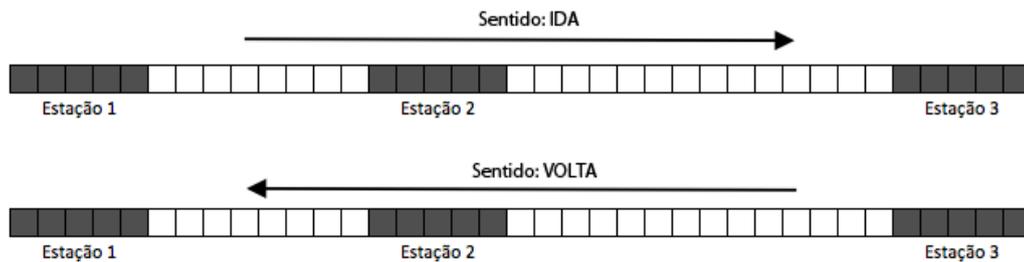
- Comprimento do trem – $C(T)$: O número de células ocupadas pelo veículo.
- Distância padrão entre trens – ΔL : Número de células de distância que o trem deve manter do trem seguinte, de forma a gerar um intervalo regular entre a passagem de trens na estação. Esta distância é dada por:

$$\Delta L = \frac{2 * C(S)}{N(L)} - C(T)$$

- Distância mínima entre trens – $\Delta_{\min}L$: A distância mínima que um trem deve manter de seu sucessor de forma a evitar acidentes. O mínimo para este valor é **1**.

A figura 13 apresenta uma visão simplificada sobre como está organizada uma linha considerando a estrutura de autômato celular. Observe que as estações se estendem por um conjunto de células (representadas pela cor cinza na figura) e o túnel é representado pelo conjunto de células entre duas estações. Cada célula representa uma distância, em metros, fixa, do sistema real.

Figura 13 – Representação simplificada da estruturação de ambos os segmento de uma linha como células



A definição de cada estação e túnel é feita na configuração inicial do modelo. Além de definir a conexão na forma de grafo, as classes *Station* e *Tunnel* também recebem como parâmetro na definição de suas instâncias o seu comprimento em células ($C(\mathbf{station})$ e $C(\mathbf{tunnel})$ respectivamente), que serão utilizadas na geração da representação destes componentes.

Cada um dos segmentos, \mathbf{S}_i representando os segmento de ida e \mathbf{S}_v representando o segmento de volta, são duas filas associadas que representam os pátios de início (\mathbf{Q}_i) e término (\mathbf{Q}_f) destes segmentos, sendo que um trem inicia seu percurso em \mathbf{Q}_i , atravessa todas as células e termina seu percurso sendo enfileirado em \mathbf{Q}_f . Ainda, temos que

$\mathbf{Qi}(\mathbf{Si}) = \mathbf{Qf}(\mathbf{Sv})$ e $\mathbf{Qf}(\mathbf{Si}) = \mathbf{Qi}(\mathbf{Sv})$. Cada um destes segmentos tem um comprimento em células \mathbf{C} , definido por:

$$C(S) = \sum_{j=1}^m C(station_m) + \sum_{k=1}^n C(tunnel_n)$$

onde \mathbf{m} é o número de estações e \mathbf{n} o número de túneis registrados na simulação.

Cada trem é representado por uma instância da classe *Train* (\mathbf{T}) que implementa *IVehicle* e definido pelas seguintes características:

- Comprimento – $\mathbf{C}(\mathbf{T})$: O número de células ocupadas pelo veículo.
- Velocidade – $\mathbf{V}(\mathbf{T})$: Número de células percorridas pelo trem a cada ciclo.
- Contêiner de Usuários – $\mathbf{Uc}(\mathbf{T})$: Estrutura de dados para armazenar os usuários que estão viajando neste trem.
- Capacidade de Absorção – $\mathbf{A}(\mathbf{T})$: Número máximo de usuários coletados a cada parada em estação.
- Tempo de Parada – $\mathbf{Tp}(\mathbf{T})$: O tempo que o trem está parado.

A conversão do modelo de grafo da linha para o autômato celular é realizada por meio do comando *build*, especificado na definição do framework apontada anteriormente. Assim, o comando cria um arranjo unidimensional para cada segmento, com $\mathbf{C}(\mathbf{S})$ posições, cada qual representando uma célula. O estado vivo da célula é a ocupação da mesma por um fragmento do trem, enquanto o estado morto é a ausência de qualquer fragmento do trem na célula. Assim, temos os seguintes estados possíveis, definidos pela ocupação da célula e seu respectivo significado:

- Célula vazia – $\mathbf{P0}$.
- Célula ocupada por um pedaço de um trem em movimento – $\mathbf{P1}$.
- Célula ocupada por um pedaço de um trem parado em estação – $\mathbf{P2}$ ($\mathbf{P2}$).
- Célula ocupada por um pedaço de um trem parado por ter atingido o limite da distância entre trens – $\mathbf{P3}$.

A atualização da situação do arranjo é feita a cada ciclo do framework, de forma a representar o deslocamento. A cada ciclo o arranjo de cada segmento é varrido e atualizado de acordo com o conjunto de parâmetros definidos para a linha em questão e para os trens, conforme explicitado no algoritmo 2, onde é feita a movimentação de estados de células para o trem em um ciclo. Note que no intervalo de um ciclo há \mathbf{K} transições de estado para cada célula, definido por:

$$K = V(T)$$

uma vez que, necessariamente, o trem avaliará as células subsequentes à sua posição e, caso a situação indique uma mudança de estado, o estado será alterado e, conseqüentemente, a movimentação do trem será interrompida (implicando em possíveis alterações para todo o restante da linha, razão essa, inclusive, para a varredura (e atualização) do arranjo ser realizada da posição final ($\mathit{mathbf{C}}(S)$) para a posição inicial ($\mathit{mathbf{C}}(1)$).

<p>Entrada: Um arranjo S representando o segmento onde ocorrerá o deslocamento</p> <pre style="margin: 0; padding-left: 20px;"> 1 $c \leftarrow \text{Comprimento}(S)$; 2 enquanto $c > 0$ faça 3 $s \leftarrow S[c]$; 4 se s é a primeira célula ocupada pelo trem então 5 $c \leftarrow (c - 1)$; 6 se (s está no estado $P1$) ou (s está no estado $P2$ e $Tp(L) = Tp(T)$) ou (s está no estado $P3$) então 7 se $S[c + 1]$ até $S[c + \Delta L + V(T)]$ estão no estado $P0$ então 8 Move o trem em s para $S[c + V(T)]$; $c \leftarrow c - C(T)$; 9 senão 10 Muda o estado de s até $S[c - C(T)]$ para $P3$; </pre>

Algoritmo 2: Algoritmo de atualização do arranjo que representa um segmento.

Ainda, é importante ressaltar que a movimentação do trem ocorre, exceto quando:

- a) sua posição máxima no momento coincide com a posição máxima de uma estação; ou
- b) a distância entre a posição máxima do trem (célula de índice mais alto ocupada pelo trem) e seu trem subsequente é menor ou igual a ΔL .

4.4 Considerações Finais

Este capítulo tratou do desenvolvimento do framework e do cenário escolhido para este trabalho. Nele, foi feita a apresentação do cenário, o Metropolitano de São Paulo, contextualizando o meio em relação ao restante do sistema de transporte disponível na cidade.

A seguir, foi apresentado o framework desenvolvido, através do diagrama de classes e a discussão de suas classes e métodos, além do funcionamento do modelo proposto, como estendê-lo para criação de novos meios e o tratamento dado ao comportamento do usuário na simulação.

Por fim, foi discutida a implementação do modal referente a transporte sobre trilhos, de acordo com o cenário proposto. Foram discutidos os conceitos utilizados, aspectos da simulação e o algoritmo utilizado para a representação do funcionamento do referido modo.

5 Avaliação do Modelo e Resultados

Este capítulo descreve a configuração e utilização da simulação, considerando como cenário o Metrô de São Paulo e a implementação de sistemas de transporte sobre trilhos construída neste mestrado. Ainda, a simulação será executada, tomando como base diversos cenários, como por exemplo, o sistema em sua operação normal e sem comportamento de usuários, a inserção de intervenções durante a operação, e a inclusão de comportamentos combinados com intervenções.

Na primeira seção, discutiremos a configuração do cenário. A seguir, a metodologia de testes utilizada. Na terceira seção, serão apresentados em detalhes os cenários e resultados encontrados. Por fim, serão feitas as considerações finais sobre os resultados obtidos.

5.1 Configuração da simulação - O Metrô de São Paulo

A configuração da simulação utiliza a extensão do framework apresentada no Capítulo 4. Sendo assim, a primeira etapa é a configuração de cada uma das linhas e, por conseguinte, a configuração do conjunto de estações (e transições internas de cada uma delas).

Pela implementação proposta, as estações e seus túneis são interligados através de suas chamadas ao construtor. Assim, temos dois construtores disponíveis. No primeiro só é informada a estação, sem nenhuma interligação, destinado a última estação da linha; no outro são informados a estação, a estação subsequente e o número de células entre uma estação e outra. A figura 14 mostra o trecho de código representando a linha amarela.

A configuração da simulação tomou como base o horário de pico matinal, definido pela Pesquisa Origem-Destino como horário de chegada ao destino entre 6h30 e 8h30 da manhã.

Figura 14 – Criação de instâncias de *Station* para a Linha 4 - Amarela

```
Station luzAmarela      = new Station("Luz - Amarela");
Station republicaAmarela = new Station("República - Amarela", luzAmarela, 48);
Station paulista       = new Station("Paulista", republicaAmarela, 92);
Station fariaLima      = new Station("Faria Lima", paulista, 144);
Station pinheiros      = new Station("Pinheiros", fariaLima, 40);
Station butanta        = new Station("Butantã", pinheiros, 34);
```

5.1.1 A Pesquisa Origem-Destino

A Pesquisa Origem-Destino (COORDENADORIA DE PESQUISA E AVALIAÇÃO DE TRANSPORTE, 2007), em sua forma completa, é realizada a cada 10 anos, sendo que, na metade deste período, é feita uma aferição, de forma a verificar a evolução dos dados neste intervalo. A última pesquisa completa foi feita em 2007, com a aferição intermediária realizada em 2012.

Vale lembrar que o objetivo desta pesquisa é verificar os fluxos de usuários dentro da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), incluindo modais utilizados, características socioeconômicas da população, além das características das viagens realizadas. A metodologia aplicada para o levantamento destas informações consiste na coleta de dados feita a partir da aplicação de um questionário a residências selecionadas a partir de um levantamento amostral dentro do cenário de estudo.

A pesquisa divide a RMSP e seus 39 municípios em 460 zonas de pesquisa distintas, sendo que 320 zonas de pesquisa correspondem a cidade de São Paulo. Desta forma, os resultados da pesquisa estão organizados em função dessas zonas, indicando, para cada conjunto de zona de origem e zona de destino, quantos usuários partiram no intervalo considerado (COORDENADORIA DE PESQUISA E AVALIAÇÃO DE TRANSPORTE, 2007).

Para este trabalho, foram utilizados os dados que indicam a origem e destino dos usuários que utilizam transporte público em horário de pico, no intervalo entre 6h30 e 8h30 da manhã. Como a distribuição das zonas inclui áreas não atendidas diretamente pelo Metrô, foi necessário tratar os dados para que se adequassem ao nosso modelo. Todavia, considerando um cenário onde todos os modais serão simulados, com toda a região metropolitana considerada na simulação, a utilização dos dados pode ser feita com alterações mínimas. A seguir, discutiremos a estratégia de tratamento adotada.

5.1.2 Tratamento dos Usuários na Pesquisa Origem - Destino

Como primeiro passo para a definição da alimentação de usuários dentro do sistema, foi realizado o tratamento das informações constantes na Pesquisa Origem-Destino para o intervalo. Este tratamento foi necessário para compatibilizar os dados disponíveis da pesquisa Origem-Destino com os dados da utilização do metrô ao longo do dia.

O tratamento feito consiste no mapeamento das regiões utilizadas na pesquisa Origem-Destino para as estações de Metrô constantes na simulação. Para isso, as zonas foram classificadas em duas categorias: as que possuem uma estação de metrô associada e as que não possuem.

O mapeamento da primeira categoria foi feito a partir da criação do vínculo entre a zona e sua respectiva estação de Metrô, sendo que, no caso de haver duas estações na mesma zona, foi atribuída aquela que está posicionada mais ao centro da região.

Por sua vez, no mapeamento da segunda categoria, de zonas sem uma estação de metrô diretamente vinculada, foi adotado como critério a estação com maior ocorrência em rotas¹ para os principais eixos de recepção de usuários em horário de pico (região central, região da Bela Vista e região da Faria Lima e Berrini). No caso de, para estas rotas não haver menções a estações de Metrô, a zona foi descartada, uma vez que isto implica na provável não utilização do modal pelos usuários de tal origem (caso observado para a região de Santo Amaro, na qual há uma oferta grande de corredores de ônibus ligando as principais regiões da cidade).

Apesar de tais decisões modificarem os dados reais, principalmente no que diz respeito ao segundo grupo, já que não há apenas o Metrô na cidade, optou-se por utilizar este tratamento para maximizar o volume de dados a ser considerado, uma vez que a pesquisa Origem-Destino não considera especificamente as estações de metrô na definição de zonas. Caso fosse utilizado apenas os dados das regiões diretamente atendidas pelo Metrô, seriam observadas situações de baixa utilização, passando longe das condições reais do sistema. Ainda, haveria uma disponibilidade bem menor de acúmulo de usuários em filas e situações de conflito, eliminando situações pertinentes de serem observadas na análise.

A seguir, foi feito o levantamento de usuários oriundos de cada origem e destino, sob a perspectiva das estações. Isto foi feito a partir da soma simples do volume de

¹Extraídas através do Google Maps, considerando a origem e o destino como pontos das respectivas zonas.

usuários, com exceção de situações cuja origem e destino são a mesma estação, portanto, não pertinentes à simulação. A tabela 6 mostra a quantidade de usuários obtida para cada uma das estações, no intervalo estudado. A tabela foi dividida em duas colunas: o número de usuários entrantes na simulação, que são os usuários obtidos pelo tratamento exposto; e o número de usuários entrantes informados pelo Metrô, de acordo com a média diária (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013). De forma a tornar o valor mais condizente com o cenário e com os dados disponibilizados pelo Metrô para o intervalo utilizado (das 6h30 às 8h30), o total de entrantes na simulação foi reduzido, de forma a se tornar equivalente a 25% dos usuários totais diários do metro (isto é, considerando-se que 25% dos usuários diários do Metrô se concentram no horário de pico matinal). Esta redução é também necessária pois nem todos os usuários que se deslocam por regiões servidas pelo Metrô realmente fazem este deslocamento todos os dias utilizando este modal.

Os valores inicialmente obtidos por meio do tratamento da pesquisa Origem-Destino para as linhas Azul, Verde e Vermelha são condizentes com o total diário disponibilizado pelo Metrô, já que ficam próximos da metade do total diário e, considerando que o horário estudado é um dos com maior volume (juntamente com o horário de pico do período de fim de tarde / início de noite). Assim, foram considerados aceitáveis.

Sobre os valores para a linha Amarela, a discrepância pode ser atribuída ao posicionamento das estações Faria Lima, Pinheiros e Butantã em relação a Zona Sul e Oeste da cidade e a outros municípios da região metropolitana de São Paulo. Como o sistema de rotas do Google Maps não considera todas as linhas intermunicipais, a definição de qual linha de metrô atende uma determinada região fica um pouco prejudicada. No escopo da simulação, para reduzir esta distorção, para os registros cuja origem foi classificada como uma estação da linha Amarela e é de alguma cidade na região metropolitana de São Paulo, o número de usuários foi reduzido pela metade (tabela 6, Linha 4 - Amarela - após redução).

Tabela 6 – Passageiros entrantes na simulação e passageiros entrantes no cenário real

	Passageiros Entrantes	
	Na Simulação / Após redução	No Cenário - Dia
Linha 1 - Azul	491.861 / 262.250	1.049.000
Linha 2 - Verde	246.670 / 129.250	517.000
Linha 3 - Vermelha	725.497 / 297.500	1.190.000
Linha 4 - Amarela	433.232 / 162.500	650.000

Uma vez definidos os dados, é necessária a configuração da simulação em si, de

acordo com o tratamento aqui exposto e a estrutura do Metrô, o que é tratado a seguir.

5.1.3 Configuração da Simulação

A configuração da simulação consiste na definição dos parâmetros de cada um dos sistemas tratados. No caso das linhas, devemos definir principalmente a relação entre tempo e ciclo e também a relação entre células e distância.

Assim, é importante destacar algumas informações extras sobre as linhas de metrô pertinentes para a simulação, que servirão como base para definir a parametrização.

O primeiro passo é a definição da extensão do ciclo. No caso, definimos o ciclo como o intervalo de tempo de 30 segundos. Sendo assim, a simulação será executada por 240 ciclos - 7200 segundos correspondendo às 2 horas das 6h30 às 8h30.

Uma vez definido o ciclo, é necessária a configuração do funcionamento dos trens. Segundo o Metrô, em (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013), há 11 tipos de trens disponíveis, entre as linhas. Um trem é composto por seis carros, sendo que cada um destes carros possui, em geral, pouco mais de 22 metros de comprimento, sendo que, para este trabalho, foi considerado que cada carro possui 25 metros de comprimento. A tabela 7 indica quantos trens operam simultaneamente em cada uma das linhas em horário de pico.

Cabe mencionar que as informações são relativas às linhas 1 - Azul, 2 - Verde, 3 - Vermelha, e 5 - Lilás. As informações da linha 4 - Amarela são de responsabilidade da ViaQuatro, e não foram disponibilizadas para a construção deste trabalho.

Tabela 7 – Trens operando em horário de pico

	Trens
Linha 1 - Azul	40
Linha 2 - Verde	22
Linha 3 - Vermelha	40
Total	102

Sobre a relação distância / células, adotamos o comprimento de um carro (25 metros) como a distância representada por cada célula (com arredondamento de valores feitos na conversão de metros para células). Utilizando então as tabelas 2, 3, 4 e 5, temos as tabelas 8, 9, 10 e 11, que mostram a conversão entre as distâncias entre as estações em metros e em células.

As estações, por sua vez, possuem cada uma 150 metros, ou seja, o equivalente

Tabela 8 – Células entre estações da linha 1 - Azul

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
Jabaquara - Conceição	1.183	47
Conceição - S. Judas	1.096	44
S. Judas - Saúde	790	32
Saúde - Pça. Da Árvore	896	36
Pça. Da Árvore - S. Cruz	1.312	52
S. Cruz - V. Mariana	1.138	46
V. Mariana - Ana Rosa	973	39
Ana Rosa - Paraíso	702	28
Paraíso - Vergueiro	683	27
Vergueiro - S. Joaquim	843	34
S. Joaquim - Liberdade	825	33
Liberdade - Sé	544	22
Sé - S. Bento	726	29
S. Bento - Luz	853	34
Luz - Tiradentes	658	26
Tiradentes - Armênia	691	28
Armênia - Tietê	1.245	50
Tietê - Carandiru	760	30
Carandiru - Santana	740	30
Santana - Jd. S. Paulo	1.474	59
Jd. S. Paulo - Parada Inglesa	1.057	42
Parada Inglesa - Tucuruvi	992	40
TOTAL	20.181	808

aos seis carros de um trem e, portanto, são representadas também por seis células.

A capacidade dos trens é definida de acordo com a frota e a linha de atendimento. A tabela 12 lista as frotas, capacidades e linhas de atendimento. Em algumas frotas, há mais de um tipo de carro, com capacidades diferentes. Nesses casos, foi extraída a média dos valores para a determinação do número de passageiros expostos. A quantidade de passageiros em pé é definida pelo Metrô considerando oito passageiros por metro quadrado como lotação máxima. Tal valor foi considerado justamente por representar o máximo (teórico) do veículo. O valor considerado adequado é de seis passageiros por metro quadrado (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013).

Para simplificar a implementação, sem ter que se preocupar com a frota a qual o veículo pertence, uma vez que não dispomos também desta informação (tal informação varia de acordo com paradas para manutenção dos trens), o número de passageiros possíveis em cada trem foi obtido através da média ponderada a partir da quantidade de trens

Tabela 9 – Células entre estações da linha 3 - Vermelha

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
Itaquera - Artur Alvim	1.461	58
Artur Alvim - Patriarca	2.109	84
Patriarca - Guilhermina	1.722	69
Guilhermina - V. Matilde	1.534	61
V. Matilde - Penha	1.183	47
Penha - Carrão	2.280	91
Carrão - Tatuapé	1.280	51
Tatuapé - Belém	1.427	57
Belém - Bresser	1.825	73
Bresser - Brás	873	35
Brás - Pedro II	1.044	42
Pedro II - Sé	727	29
Sé - Anhangabaú	688	28
Anhangabaú - República	641	26
República - S. Cecília	772	31
S. Cecília - Mal. Deodoro	926	37
Mal. Deodoro - Barra Funda	1.544	62
TOTAL	22.036	881

Tabela 10 – Células entre estações da linha 2 - Verde

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
V. Prudente - Tamanduateí	1.281	51
Tamanduateí - Sacomã	1.697	68
Sacomã - Alto do Ipiranga	981	39
Alto do Ipiranga - Imigrantes	1.121	45
Imigrantes - Chácara Klabin	1.119	45
Chácara Klabin - Ana Rosa	1.526	61
Ana Rosa - Paraíso	706	28
Paraíso - Brigadeiro	1.015	41
Brigadeiro - Trianon MASP	954	38
Trianon MASP - Consolação	982	39
Consolação - Clínicas	1.063	43
Clínicas - Sumaré	769	31
Sumaré - V. Madalena	1.489	60
TOTAL	14.703	589

de cada frota e o número de passageiros de cada carro, conforme representado na tabela 13. No caso da linha 4 - Amarela, dadas as restrições da concessionária responsável na liberação dos dados mencionadas anteriormente, os valores foram definidos com base na linha 2 - Verde, a mais próxima em características (extensão e volume de passageiros) a

Tabela 11 – Células entre estações da linha 4 - Amarela

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
Luz - República	1.200	48
República - Paulista	2.300	92
Paulista - Faria Lima	3.600	144
Faria Lima - Pinheiros	1.000	40
Pinheiros - Butantã	850	34
TOTAL	8.950	358

Tabela 12 – Capacidade dos trens por frota

Fonte: Extraído de (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013)

Frota	Trens	Linha de Operação	Passageiros por Carro	Passageiros por Trem
A	27	Azul	308 (60 sentados, 248 em pé)	1.848
C	7	Vermelha	377 (60 sentados, 277 em pé)	2.022
D	12	Vermelha	377 (60 sentados, 277 em pé)	2.022
E	11	Verde	341 (45 sentados, 296 em pé)	2.046
G	16	Verde	259 (44 sentados, 215 em pé)	1.554
H	17	7 Azul / 10 Verm.	338 (43 sentados, 295 em pé)	2.028
I	11	Azul	347 (44 sentados, 303 em pé)	2.082
J	13	Azul	331 (45 sentados, 286 em pé)	1.986
K	18	Vermelha	341 (42 sentados, 299 em pé)	2.046
L	10	Vermelha	352 (44 sentados, 308 em pé)	2.112

ela.

Tabela 13 – Passageiros por trem (média das frotas)

Fonte: Extraído de (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013)

Linha	Passageiros por Trem (Média das Frotas)
Azul	2.411
Verde	1.749
Vermelha	2.046
Amarela	1.749

A respeito dos parâmetros definidos para cada uma das linhas, eles foram extraídos também de informações obtidas em (GERÊNCIA DE OPERAÇÕES, 2013), e constam na tabela 14 para cada uma das linhas. Para a linha 4 - Amarela foram aplicadas a mesma distância mínima entre trens e velocidade, chegando então aos outros parâmetros.

A configuração dos usuários foi feita utilizando os resultados da pesquisa Origem -

Tabela 14 – Parâmetros por linha utilizados na simulação

Parâmetro	Valor			
	Linha Azul	Linha Verde	Linha Vermelha	Linha Amarela
Número Máximo de Trens	40	22	40	16
Velocidade (em células por ciclo)	12	13	15	13
Distância mínima entre trens (em células)	41	47	38	43
Tempo de parada na estação (ciclos)	1	1	1	1
Comprimento do trem (em células)	6	6	6	6
Capacidade do trem (em passageiros)	2.411	1.749	2.046	1.749

Destino, com as reduções mencionadas anteriormente. As combinações com zero usuários foram excluídas, uma vez que representam a ausência de usuários fazendo o trajeto em questão.

A partir destes dados, o número de usuários, para cada uma das combinações, foi dividido pelo número de ciclos (240). Este valor indica o número de usuários por ciclo para a origem - destino em questão. Sobre estes valores, foi feito o arredondamento, gerando um número inteiro, sobre o qual foi feito dois tratamentos, de acordo com o valor.

O primeiro tratamento foi feito quando o valor encontrado é maior que um. Neste caso, a combinação foi considerada em sua forma natural, com o valor arredondado representando o número de usuários por ciclo gerados para aquela combinação.

O segundo tratamento foi feito quando o arredondamento resulta em zero. Neste caso, o arredondamento é desconsiderado e é feita a divisão de 1 pelo número de usuários por ciclo. Sobre este valor também é feito um arredondamento para inteiro, já que representa um número de ciclos. Este valor indica a taxa de aparição (em ciclos) de um usuário para aquela combinação origem - destino. Por exemplo, se o valor encontrado é 5, isto indica que para o trajeto em questão, a cada cinco ciclos, será gerado um usuário.

Uma vez feita a configuração e o mapeamento da geração de usuários, a simulação pode ser executada. A seguir, será exposta a estratégia utilizada para a realização dos testes e validação do framework, além da avaliação dos resultados.

5.2 Testes e Validação

Para a verificação do modelo proposto, foram gerados alguns cenários de forma a validar o framework desenvolvido.

O primeiro cenário consiste na simulação em sua forma mais básica, sem a utilização de comportamentos para o usuário, ou seja, o usuário define sua rota ao entrar na simulação e, a partir daí, não a altera. O sistema também não sofre modificações durante sua execução, ou seja, não há intervenções acionadas. O objetivo é identificar o funcionamento padrão do sistema e a coleta de dados. Sendo assim, espera-se que a simulação apresente funcionamento constante, com entrada, saída e fluxo de usuários uniforme.

O segundo cenário é uma réplica do cenário anterior, contudo são inseridas intervenções em cada uma das linhas - a redução de velocidade dos trens em um determinado ciclo, cujo detalhamento é dado na discussão do cenário. A intenção é identificar o funcionamento das intervenções e a visualização de impactos em todo o sistema. Assim, a simulação deve apresentar mudanças no acúmulo de usuários em estações e nas conexões vinculadas à linha atingida a partir da ativação da intervenção.

O terceiro cenário é a réplica do cenário anterior, com o acréscimo do comportamento do usuário. Metade dos usuários é criada com o comportamento padrão, enquanto a outra metade entra com o comportamento “Agressivo”. O objetivo aqui é identificar o funcionamento do mecanismo de perfis e também seu efeito na simulação. É esperado que o fluxo de usuários apresente alterações em relação ao cenário anterior ocasionadas pelas mudanças de rotas dos usuários com perfil “Agressivo” no acionamento da intervenção. Também é esperada uma redução no tempo médio de deslocamento.

O quarto cenário é a repetição do cenário anterior, porém mesclando os três comportamentos possíveis: “Agressivo”, “Moderado” e “Conservador”. A proposta é visualizar a simulação funcionando com um aspecto mais próximo do cenário real. Aqui são esperadas alterações em relação aos cenários anteriores, onde as alterações não deverão ser tão drásticas quanto o cenário 3, mas devem diferir do cenário 2, já que haverá uma parcela de usuários significativa mudando de rotas no acionamento da intervenção. Aqui, o tempo médio de deslocamento deve aumentar, em relação ao cenário 3, e ser menor que o observado no cenário 2.

Temos ainda o quinto cenário, onde é feita uma adaptação do cenário anterior, porém removendo a capacidade de verificação de melhor rota na entrada para o comportamento “Conservador”, e a manutenção dos outros dois comportamentos. Este cenário

tem por objetivo verificar o impacto causado pela ausência de conhecimento do usuário, mesmo que de apenas uma parcela, sobre a situação do sistema. Deve ser observadas alterações mais sutis que o cenário anterior, porém o tempo médio de deslocamento deve ser maior que o cenário anterior, ocasionado pela falta de capacidade de replanejamento de rotas no perfil “Conservador”.

Por fim, no último cenário, são mantidas as configurações do cenário anterior, porém com o acréscimo de uma nova linha (com os respectivos mapeamentos), de forma a visualizar os efeitos de uma nova linha no sistema. A candidata, no caso, é a linha Laranja, que, segundo a previsão de construção, terá conexões com todas as quatro linhas: Azul, Verde, Vermelha e Amarela. Mais sobre a linha será apresentado adiante, juntamente com o detalhamento do cenário. Neste cenário, o tempo médio de deslocamento deve ser reduzido em relação a todos os cenários observados até então, já que haverá mais opções de caminho disponíveis. Todavia, vale ressaltar que os usuários novos gerados pelo aumento da oferta (por exemplo, aqueles que deixam de usar ônibus e passam a usar o metrô) não estão sendo considerados.

A simulação foi configurada para trabalhar sempre com 240 ciclos além de 60 ciclos iniciais, definidos para a preparação do ambiente. Isto foi feito pois no intervalo de tempo estudado, o sistema já está em funcionamento, logo, haverá usuários inseridos no sistema e os trens já estarão em deslocamento, devendo então haver uma certa uniformidade nos tempos de espera e deslocamento observados. Os gráficos aqui apresentados contam o ciclo 0 como o ciclo 60 da execução, já que os dados dos ciclos anteriores causariam distorções. Caso a simulação considerasse o início da operação do sistema de transporte, por exemplo, estes ciclos iniciais não seriam necessários (afinal, o sistema é iniciado vazio).

5.2.1 Cenário 1: Simulação Básica

O primeiro cenário foi criado para aferir o funcionamento da simulação. Sendo assim, a simulação foi configurada com a estrutura apresentada na seção anterior incluindo a distribuição de usuários.

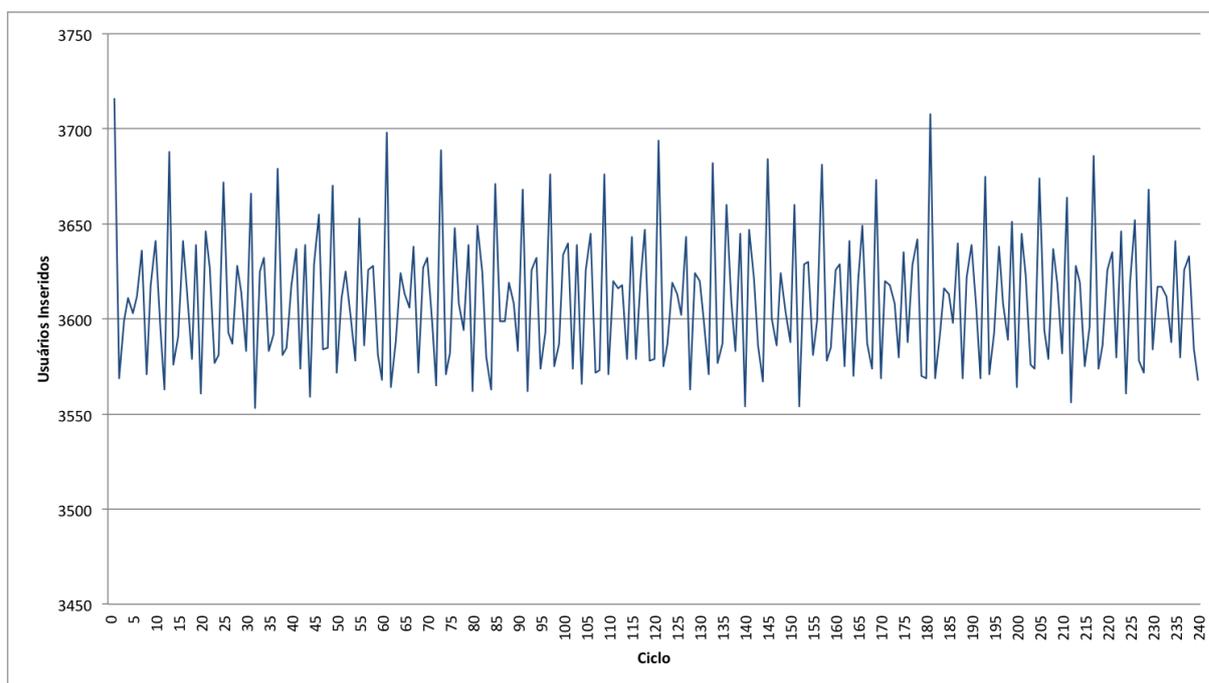
Neste ponto, não foram inseridas informações acerca de intervenções na linha, tampouco perfis de usuário diferentes. Sendo assim, a linha deverá funcionar de forma uniforme e os usuários decidirão sua rota ao entrar no sistema, não sofrendo alterações no decorrer da execução.

Serão observados os seguintes aspectos neste cenário:

- Número de usuários inseridos na simulação – Será feita a comparação entre o número de usuários adicionados à simulação em relação ao esperado, considerando também a progressão destes valores. É esperado o crescimento linear deste número.
- Tempo de espera nas estações – O tempo de espera nas estações deve variar de acordo com o acúmulo de usuários na estação.
- Entradas nas conexões – A entrada de usuários nas conexões indica que a interligação entre as linhas (sistemas) está funcionando adequadamente. Ainda, estes dados serão usados para comparação com outros cenários definidos adiante.

O número de usuários entrantes na simulação é obtido a partir da soma simples do número de usuários gerados a partir dos mapeamentos definidos. No nosso caso, como temos um número de ciclos iniciais, para a estabilização do cenário, então o número de usuários gerados neste intervalo inicial será desconsiderado.

Figura 15 – Gráfico - Cenário 1: Usuários Inseridos por Ciclo



O gráfico da figura 15 mostra o número de usuários inseridos na simulação por ciclo. Como é possível observar, o valor varia entre 3716 usuários / ciclo (mínimo) e 3.553 usuários / ciclo (máximo), com a média de 3.610 usuários por ciclo. A variação de valores é esperada e atribuída aos usuários que entram na simulação em ciclos alternados, sendo que o valor mantém-se próximo da média, conforme esperado. O valor acumulado, por

sua vez, possui crescimento linear, indicando a estabilidade de usuários / ciclo gerados pela simulação.

Comparando o número de entradas de usuários por linha (tabela 15), é possível notar a similaridade entre os valores do conjunto de dados utilizado e dos dados utilizados pela simulação. A diferença de valores encontrada pode ser atribuída aos arredondamentos feitos no tratamento realizado para a obtenção dos valores por ciclo. A razão entre a diferença de valores e o total registrado é de 1,7%, ou seja, não há uma distorção significativa gerada por esta diferença. Ainda, vale destacar que o intervalo considerado é de duas horas (das 6h30 às 8h30), dividido em grupos em 30 segundos.

Tabela 15 – Cenário 1: Entradas no sistema na Pesquisa Origem - Destino e na Simulação

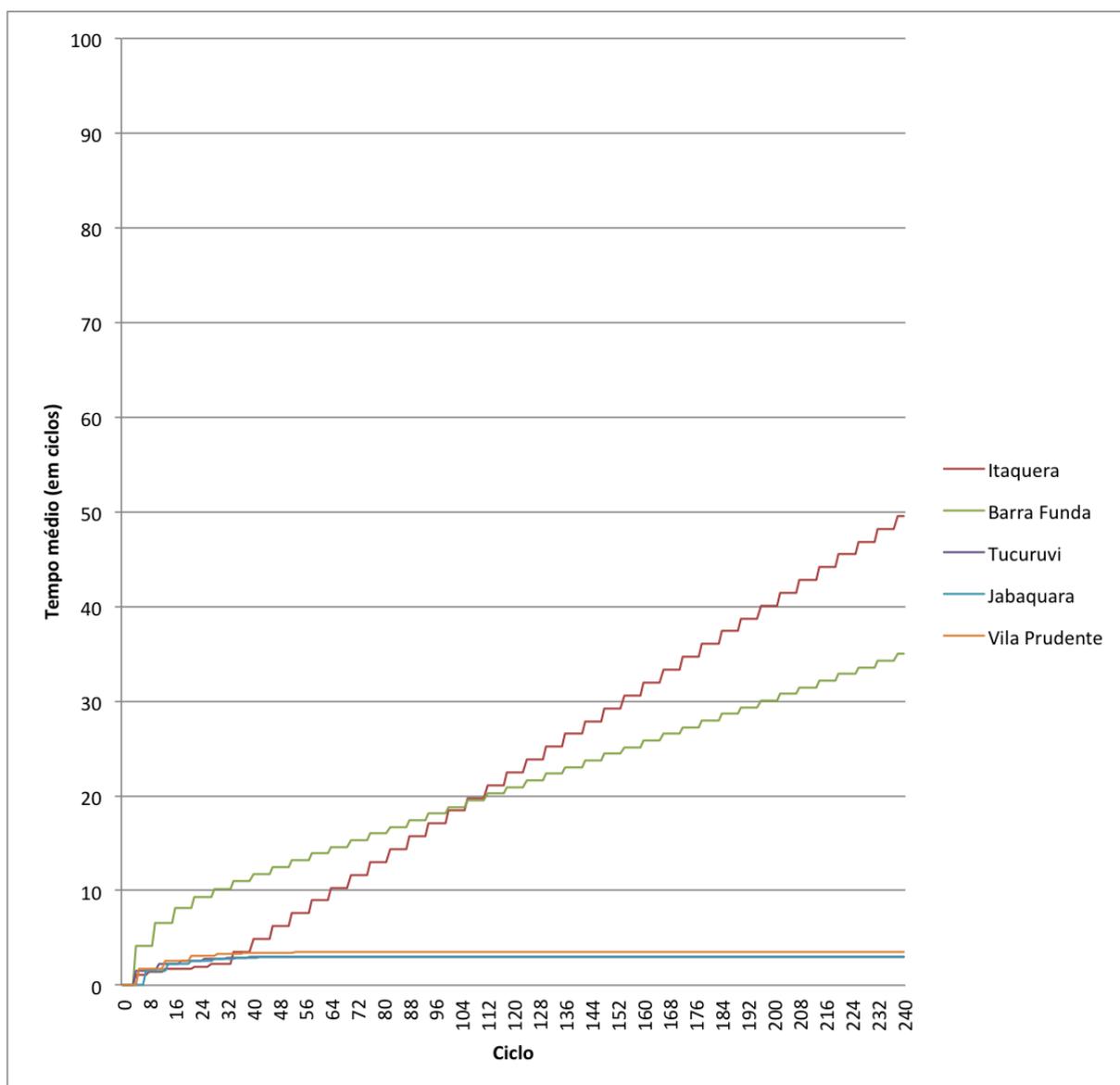
Linha	Entradas Origem - Destino	Entradas Simulação	Diferença
Azul	262.250	267.512	2,0%
Verde	129.250	133.740	3,4%
Vermelha	297.500	302.659	1,7%
Amarela	162.500	162.488	0%
Total	851.500	866.399	1,7%

Apesar de se esperar que o número de saídas também deva refletir o número de entradas, uma parcela das saídas ocorre fora do intervalo estudado, uma vez que os valores registrados na pesquisa Origem - Destino levam em conta apenas a entrada de usuários e não o momento em que chegam ao seu destino, havendo casos de entradas no sistema sem a ocorrência de saída.

O tempo de espera nas estações deve evoluir de duas formas possíveis, neste cenário: Caso a oferta de trens seja insuficiente, o tempo médio de espera deve aumentar. Caso contrário, ou seja, a oferta de trens é suficiente para atender à demanda, o tempo médio de espera deverá se estabilizar no intervalo médio de passagem de trens na estação em questão. O gráfico da figura 16 ilustra as cinco estações terminais com o maior fluxo de entrada de usuários. O cálculo da média de tempo de espera é feito sempre que um trem chega na estação, logo, os trechos constantes ocorrem devido ao intervalo entre os trens.

As estações Itaquera e Barra Funda, claramente apresentam uma demanda maior do que a oferta de lugares, por isso, apresentam crescimento constante de tempo de espera. O intervalo médio entre trens é uma parada a cada cinco ciclos, ou seja, são removidos da estação 2.046 passageiros a cada seis ciclos (a capacidade do trem, visto que é a primeira estação do segmento). Levando em conta que o número de entradas por ciclo na estação

Figura 16 – Gráfico - Cenário 1: Evolução do tempo médio de espera na estação

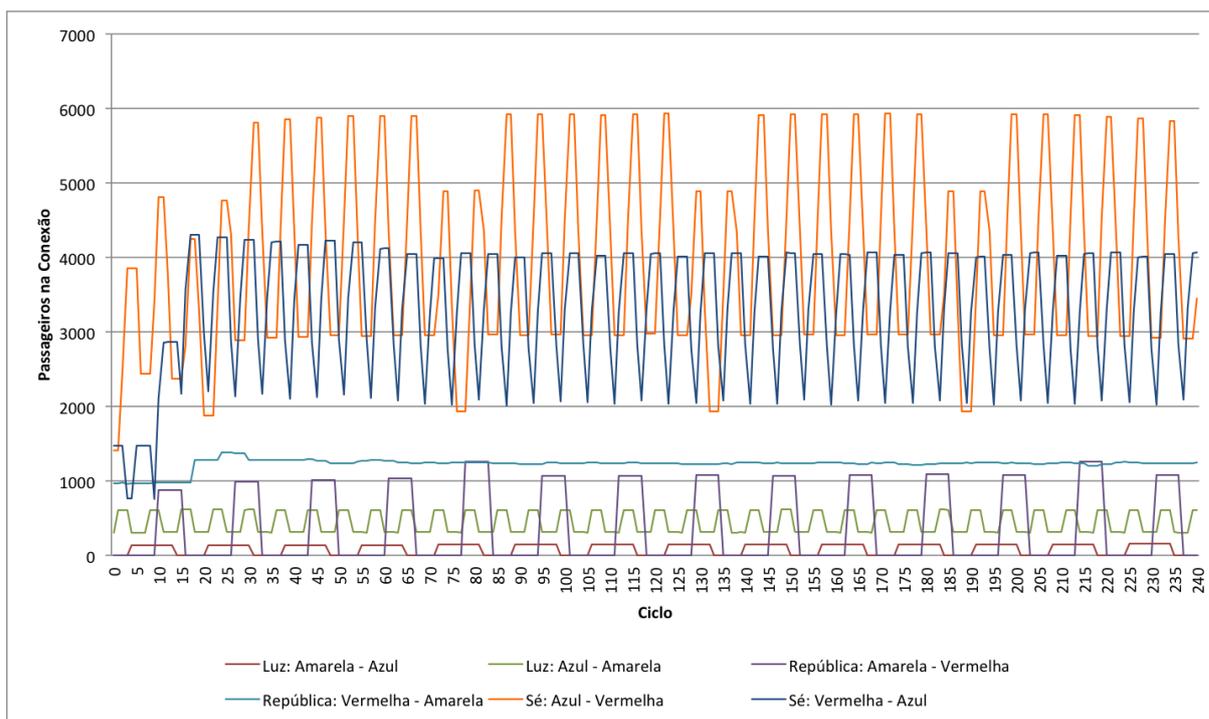


Itaquera é de aproximadamente 440 passageiros por ciclo (2.640 passageiros) e na estação Barra Funda é de 385 passageiros aproximadamente (2.310 passageiros no total), temos então a explicação para o acúmulo de passageiros e, por conseguinte, do aumento no tempo médio de espera.

Já nas estações Vila Prudente, Jabaquara e Tucuruvi a capacidade dos trens é suficiente para a demanda apresentada. Inclusive, no gráfico, as linhas que representam as estações Tucuruvi e Jabaquara se sobrepõem, com a mesma média de tempo de espera, já que a mesma vem justamente da média do intervalo entre os trens. O mesmo ocorre com a estação Vila Prudente.

O gráfico da figura 17 apresenta o número de passageiros em conexões a cada ciclo. Neste gráfico estão representadas as conexões da região central da cidade, as quais, permitem maior flexibilidade na escolha de caminho e as quais sofrem maiores alterações em mudanças de estado da simulação.

Figura 17 – Gráfico - Cenário 1: Passageiros em conexões por ciclo



Nas conexões é possível notar três situações distintas. Nas conexões com maior volume de passageiros, no caso a conexão da estação Sé (e na conexão Luz Azul - Amarela em menor escala), temos picos, os quais indicam a chegada de algum trem e consequente entrada de mais passageiros na transferência, e vales, que indicam a saída dos passageiros do último desembarque. Pode se notar um valor mínimo bem distante de zero, o que significa que a estação possui um fluxo constante de passageiros, ou seja, antes que todos saiam da conexão, há a entrada de novos passageiros. Este comportamento ocorre porque o intervalo entre os trens (e desembarques) não é suficiente para prover um fluxo constante de passageiros.

A segunda situação é a observada na conexão República Vermelha - Amarela, a qual apresenta um volume constante de passageiros. De forma similar a primeira situação, implica na recepção constante de novos passageiros, com a diferença que, aqui, o intervalo entre os trens resulta em um fluxo constante de novos passageiros. A implicação é que possivelmente o recebimento de um número maior de passageiros vá ocasionar na

superlotação desta conexão (a linha apresentará uma tendência de crescimento).

Na terceira situação, temos o mesmo mecanismo de picos e vales, estes com valor zero. Neste caso, antes que um novo trem chegue, os passageiros que entraram anteriormente já cruzaram a conexão, ou seja, há momentos em que a conexão fica vazia.

Estas observações serão retomadas nos outros cenários, quando forem feitas alterações na simulação com impactos diretos nestas conexões.

5.2.2 Cenário 2: Simulação com Intervenções

Neste cenário, o objetivo é aferir o funcionamento das intervenções. Sendo assim, as configurações feitas no cenário anterior serão mantidas, com a inserção de alterações de velocidade dos trens durante o período simulado.

A velocidade será reduzida pela metade em uma linha completa. O efeito observado será o aumento do tempo médio de espera nas estações, uma vez que o intervalo entre trens aumentará consideravelmente. O momento de ativação das intervenções será no ciclo 180, que representa a metade da simulação (60 ciclos iniciais, 120 operacionais). Será feita a alteração na linha Vermelha, a qual possui maior volume de usuários em ambos os sentidos.

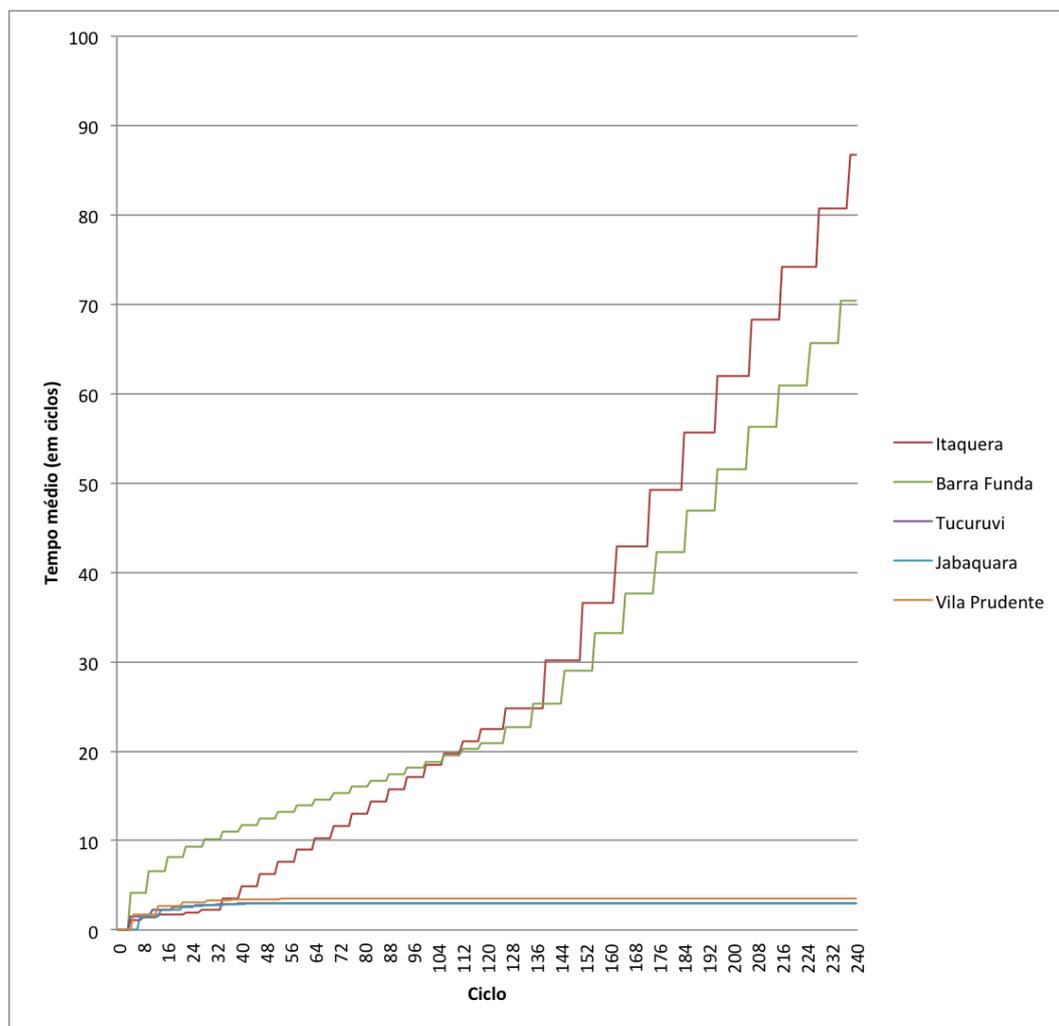
A primeira observação a ser feita será no impacto da intervenção no tempo médio de espera. É esperado que o tempo médio aumente significativamente, já que o intervalo entre trens aumentará. Em seguida, serão observadas as alterações resultantes na conexão entre as estações observadas no cenário anterior e os impactos que as alterações tiveram sobre elas. É esperado um aumento nas transferências que sejam rotas alternativas ao uso da linha vermelha.

O gráfico da figura 18 apresenta a evolução do tempo médio de espera na estação. Nas imediações do ciclo 180, quando é iniciada a redução de velocidade na linha Vermelha, a média do tempo de espera aumenta abruptamente e, em seguida, continua com uma tendência de crescimento linear, porém, com maior espaçamento entre os ciclos para aumento, já que os momentos constantes representam o intervalo entre os trens. O intervalo entre os trens para esta linha aumenta, de cinco ciclos a cada parada, para onze ciclos a cada parada.

As demais estações, por sua vez, apresentam o mesmo resultado encontrado no cenário 1, portanto, não são afetadas pela redução de velocidade diretamente, porém, são

afetadas a partir de alterações nas conexões, alterando o fluxo de usuários, como veremos adiante. Cabe ressaltar que as estações aqui observadas estão no fim da linha e, portanto, não possuem o volume de entrada de usuários alterado.

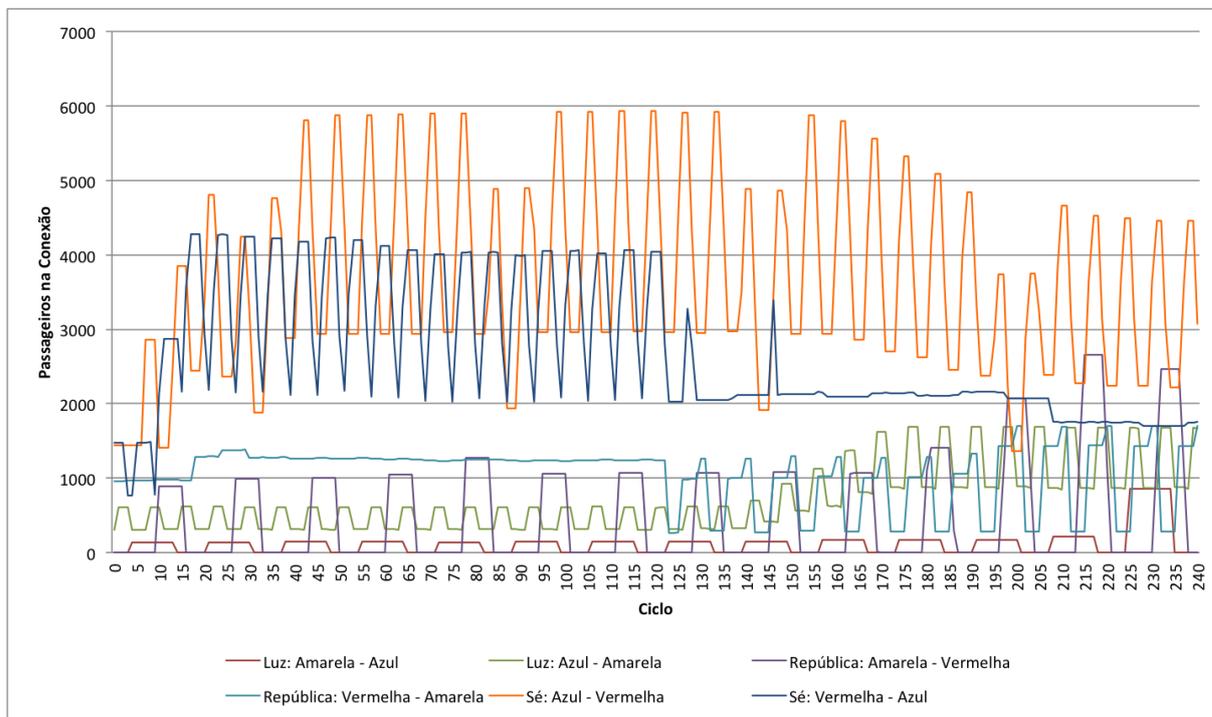
Figura 18 – Gráfico - Cenário 2: Evolução do tempo médio de espera na estação



No gráfico da figura 19, temos os passageiros em conexão por ciclo. Mais uma vez é possível notar que, antes da intervenção (ou seja, do ciclo 0 ao 119), o gráfico é praticamente idêntico ao seu equivalente no primeiro cenário. Contudo, uma vez que a intervenção é ativada, o comportamento muda radicalmente, aumentando o fluxo de usuários naquelas estações que ligam estações da linha Vermelha a outras linhas, e diminuindo o fluxo daquelas cujo destino é uma estação da linha Vermelha. Isto porque, ao definir a rota após o início da intervenção, os passos envolvendo trechos da linha Vermelha possuem um custo maior, então, há diversas rotas pelas quais passa a ser preferível desembarcar o mais rápido possível dessa linha e utilizar a conexão com alguma outra.

Sendo assim, a melhor rota, escolhida pelo usuário ao entrar na simulação, é alterada.

Figura 19 – Gráfico - Cenário 2: Passageiros em conexões por ciclo

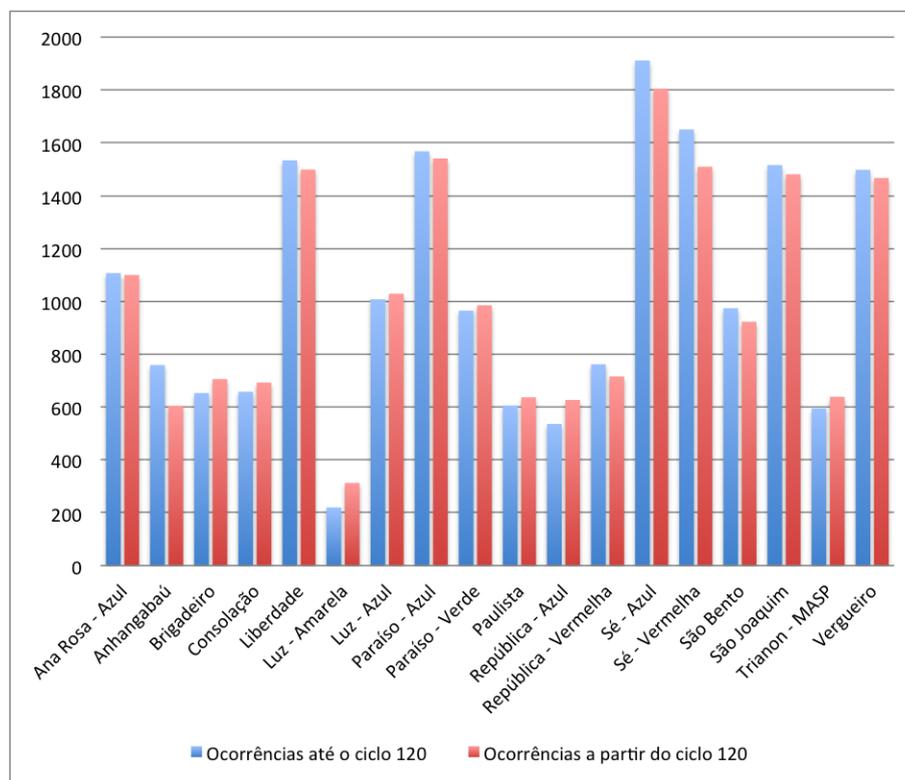


Desta forma, é possível observar que as intervenções estão sendo acionadas adequadamente e, conforme esperado, causando impactos no fluxo de usuários. Como o objetivo deste cenário foi aferir o funcionamento das intervenções, foi realizada a aplicação em apenas uma linha, para simplificar o processo de comparação com o primeiro cenário. É possível utilizar mais intervenções em outras linhas e outras situações, porém os resultados mudam consideravelmente, o que é útil em um cenário real, mas dificultaria a comparação com o primeiro cenário e o estabelecimento de relações de causa e efeito gerados pelas alterações, e, conseqüentemente, a verificação do modelo proposto.

Também é possível observar estas modificações no fluxo de usuários pelo gráfico da figura 20, o qual mostra o número de ocorrências de estações nas rotas antes e depois da ativação da intervenção. O gráfico mostra apenas as estações onde houve alterações. É possível observar que todas as alterações envolvem rotas alternativas, havendo diminuição do uso das estações da linha Vermelha e aumento nas linhas Verde, Amarela e Azul.

Os próximos cenários apresentarão simulações com diferentes comportamentos de usuários, combinados com intervenções como forma de estímulo a mudanças de rotas.

Figura 20 – Gráfico - Cenário 2: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção

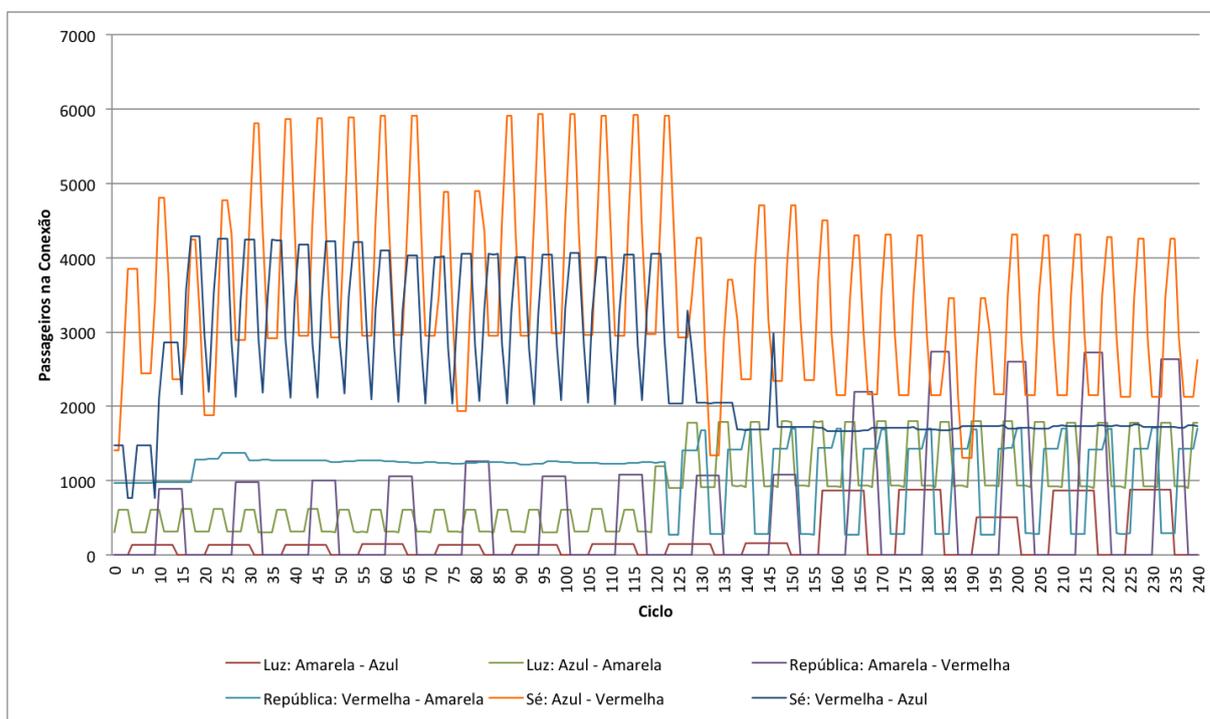


5.2.3 Cenário 3: Simulação com Comportamento de Usuário Agressivo

Neste cenário, manteremos a configuração do cenário anterior, com a diferença que todos os usuários inseridos estarão configurados com um perfil agressivo de seleção de rotas, ou seja, quando uma interrupção ocorrer, todos os usuários reavaliarão seu caminho, optando por mudar sua rota para aquela mais curta a partir de sua posição atual.

A modificação esperada, neste caso, é a antecipação da mudança de fluxo de usuários nas conexões. Isto porque, no cenário anterior, quando uma intervenção ocorre, as mudanças de rotas serão acionadas apenas para os usuários adicionados na simulação a partir daquele instante, demorando alguns ciclos para apresentar reflexos (os ciclos necessários para chegar até a conexão). Neste caso, como os usuários que já estão se deslocando serão também atualizados, a modificação dos fluxos das conexões ocorrerá mais cedo, bem próximo do ciclo 120. Isto pode ser observado no gráfico da figura 21. Observe que as modificações aparecem alguns ciclos antes, mais próximas do ciclo 120, se comparado com o gráfico 19, do cenário anterior.

Figura 21 – Gráfico - Cenário 3: Passageiros em conexões por ciclo



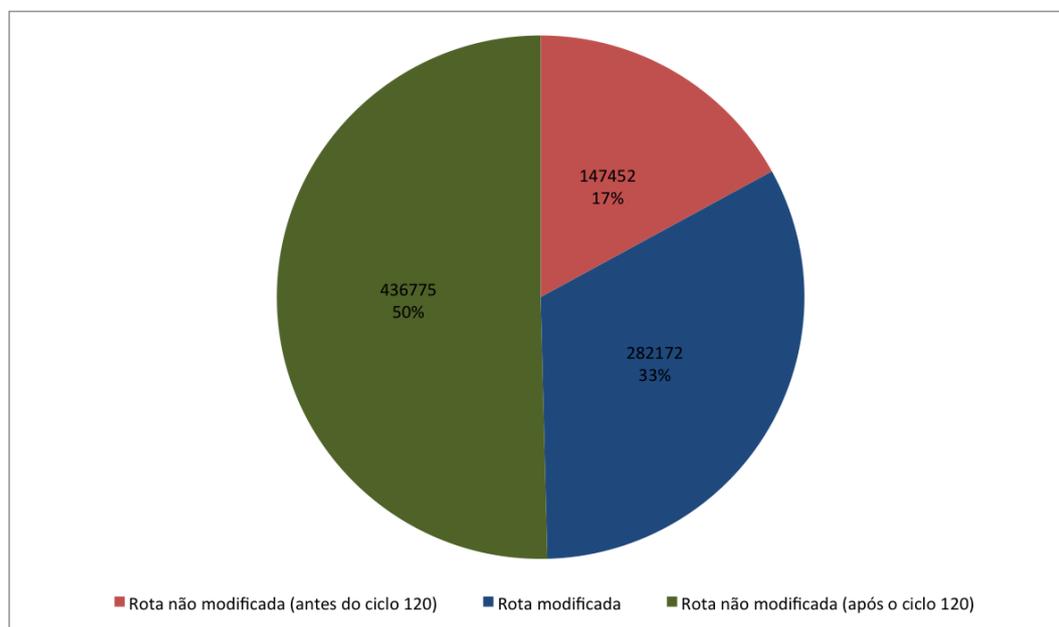
O gráfico da figura 22 mostra a distribuição dos usuários cuja rota foi modificada na ativação da intervenção. Como a intervenção é ativada a partir da metade da simulação, metade dos usuários não tem sua rota modificada. Todavia, após o início da intervenção, temos que 17% não apresentam modificações em sua rota, isto porque já tem, no momento da ativação, a melhor rota possível para seu caminho. Os 33% são aqueles com comportamento “Agressivo” e que encontraram uma melhor rota do que sua escolha inicial, quando a linha em questão apresentou mudanças de velocidade.

O restante do estado da simulação é similar ao cenário 2, tanto no estado antes da intervenção, quanto após. Ainda, é importante ressaltar que, uma vez que se trata da mesma intervenção, as rotas geradas são idênticas, tanto antes quanto após a intervenção. O gráfico 23 mostra a evolução do tempo médio de espera para algumas estações. Observe a mudança, a partir do ciclo de acionamento da intervenção, no tempo médio de espera para as estações Itaquera e Barra Funda, ambas na linha afetada.

Assim, é possível notar os efeitos da ativação do perfil de usuário agressivo na simulação, em sua totalidade. Em suma, os efeitos deste perfil refletem em uma maior dinâmica do usuário dentro do sistema, com tempo menor de reflexo para ações tomadas.

A seguir, serão apresentados o resultado da simulação com todas as características

Figura 22 – Gráfico - Cenário 3: Distribuição de usuários - Rota modificada durante o trajeto



disponíveis, com usuários apresentando diversos comportamentos e mais intervenções.

5.2.4 Cenário 4: Simulação Completa

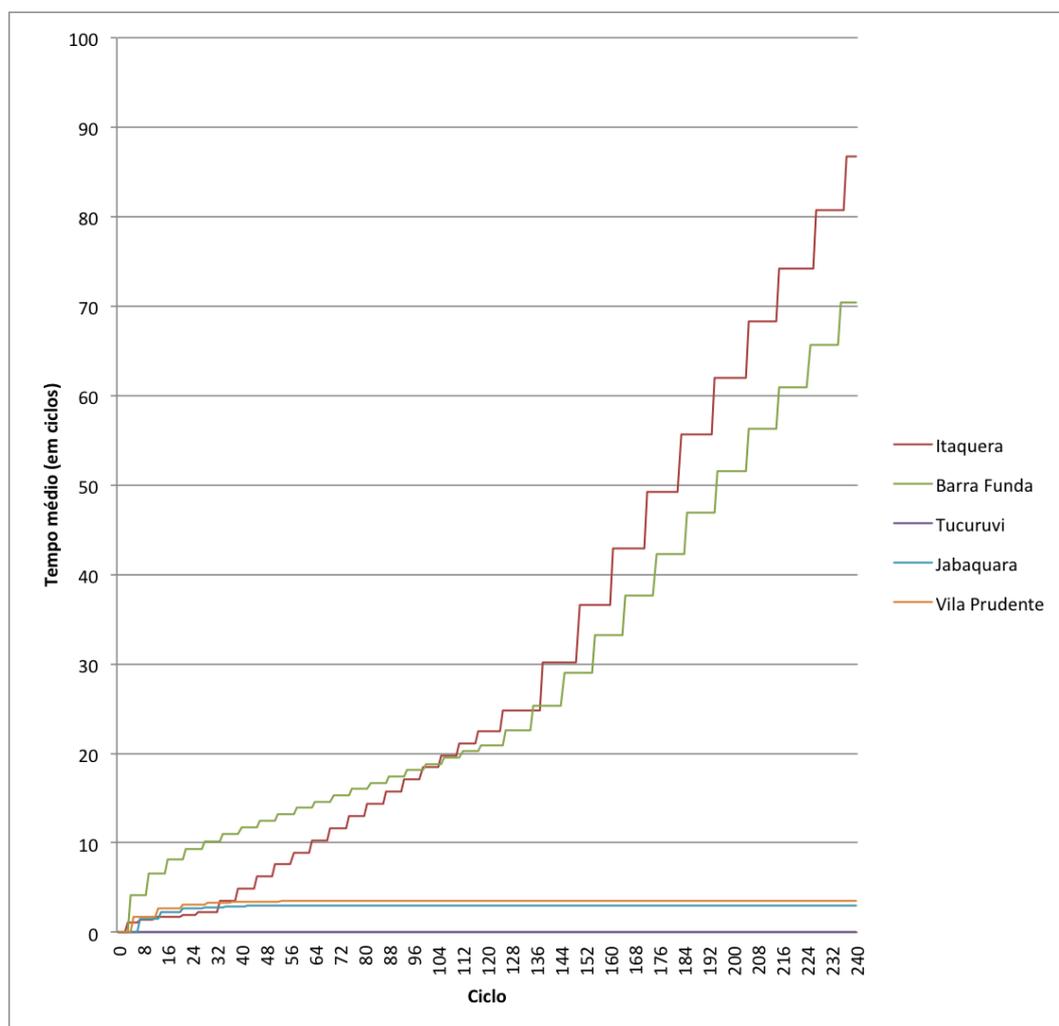
Uma vez averiguado o funcionamento, tanto da simulação em sua forma mais simples, quanto dos outros aspectos possíveis, como intervenções e ativação de comportamentos de usuário, resta ainda averiguar o funcionamento de um cenário mais complexo, com diversos comportamentos e mais de uma intervenção, acionada em diversos momentos.

Sendo assim, o sistema foi utilizado com a configuração básica, acrescida de duas intervenções: uma acionada no ciclo 120 (180, considerando os ciclos iniciais) e término no ciclo 180 (ciclo 240, considerando os ciclos iniciais), sendo esta a redução de velocidade pela metade na Linha Vermelha. A segunda intervenção corresponde à redução da velocidade pela metade na Linha Azul e terá seu acionamento no ciclo 180 e permanecerá acionada até o fim da simulação.

A configuração dos comportamentos de usuário foi feita da seguinte forma:

- 50% apresentarão o comportamento *Conservador* - Manterão a rota definida na entrada da simulação, mesmo que o cenário mude completamente.

Figura 23 – Gráfico - Cenário 3: Evolução do tempo médio de espera na estação



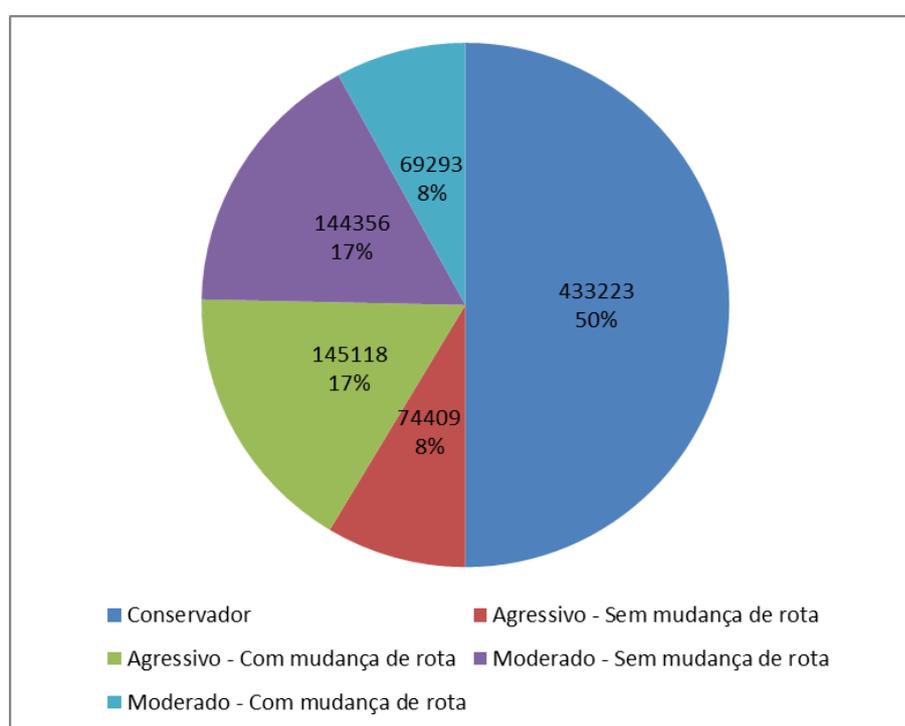
- 25% apresentarão o comportamento *Agressivo* - Mudarão a rota definida na entrada sempre que houver alguma alteração na simulação.
- 25% apresentarão o comportamento *Moderado* - Poderão mudar ou não a rota definida na entrada da simulação. No nosso caso, a chance de alteração foi definida em 50%.

A definição dos comportamentos será feita de maneira aleatória, ou seja, serão definidos ao acaso, quando da sua criação. Para tal, será usado o mecanismo de inicialização já existente, com a ordem de entrada dos usuários feita de forma aleatória, para não criar blocos com a mesma origem e destino.

O primeiro ponto a ser observado neste cenário é a distribuição de usuários, conforme o gráfico na figura 24. Nele, está representada a distribuição de usuários por tipo de

comportamento e se houve ou não modificação de sua rota durante a execução. É possível observar que, dadas pequenas diferenças oriundas de arredondamentos, a distribuição de usuários segue a proporção 50% / 25% / 25% (*Conservador* / *Moderado* / *Agressivo*) definida para a simulação. Ainda, é possível observar a diferença entre a ocorrência de mudanças de rota, entre os comportamentos *Moderado* e *Agressivo*, o qual apresenta maior volume de mudanças de rota em relação ao comportamento *Moderado*.

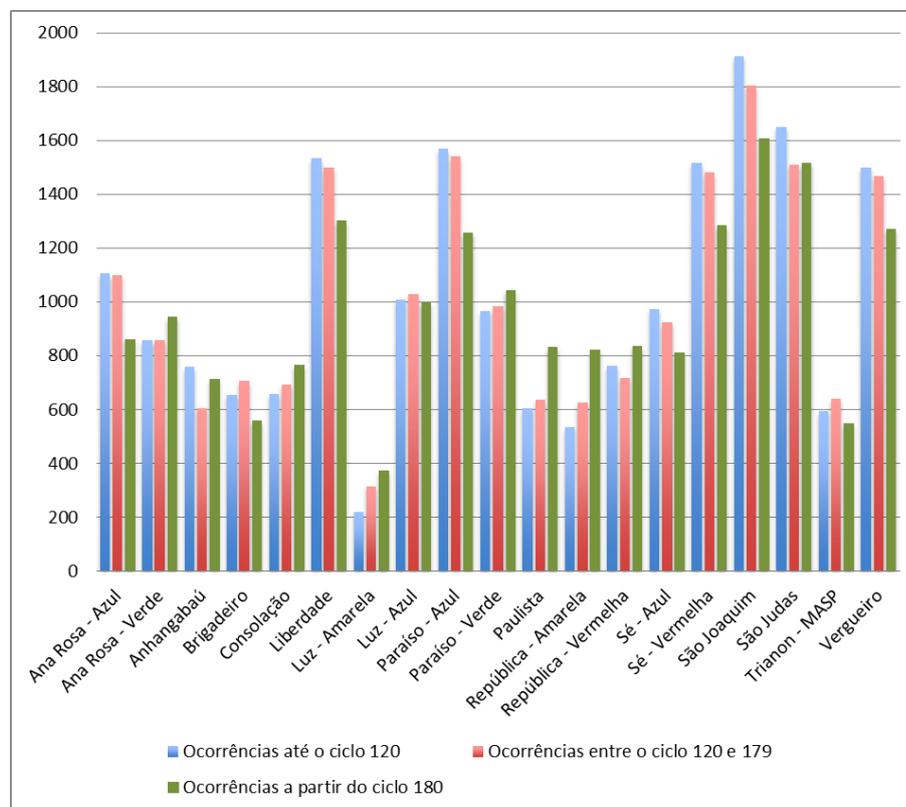
Figura 24 – Gráfico - Cenário 4: Distribuição de usuários - Rota modificada durante o trajeto



Sobre as rotas, é possível observar também a modificação do número de passageiros nas estações, de acordo com o gráfico da figura 25, no qual são mostradas as estações com mudança no número de passageiros entre o estado inicial, acionamento da primeira intervenção, na linha Vermelha, e desligamento da primeira intervenção com acionamento da segunda intervenção, na Linha Azul.

Assim como esperado, o tempo médio de espera na estação é modificado quando do acionamento e desligamento de intervenções, como pode ser visto no gráfico da figura 26. No caso do acionamento da intervenção da linha Vermelha, a taxa de crescimento do tempo médio de espera aumenta (ciclo 120), voltando ao crescimento anterior em sua desativação (ciclo 180). Por sua vez, a linha Azul apresenta modificações no tempo médio de espera a partir do ciclo 180, quando tem sua velocidade reduzida. Note que esta linha,

Figura 25 – Gráfico - Cenário 4: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção

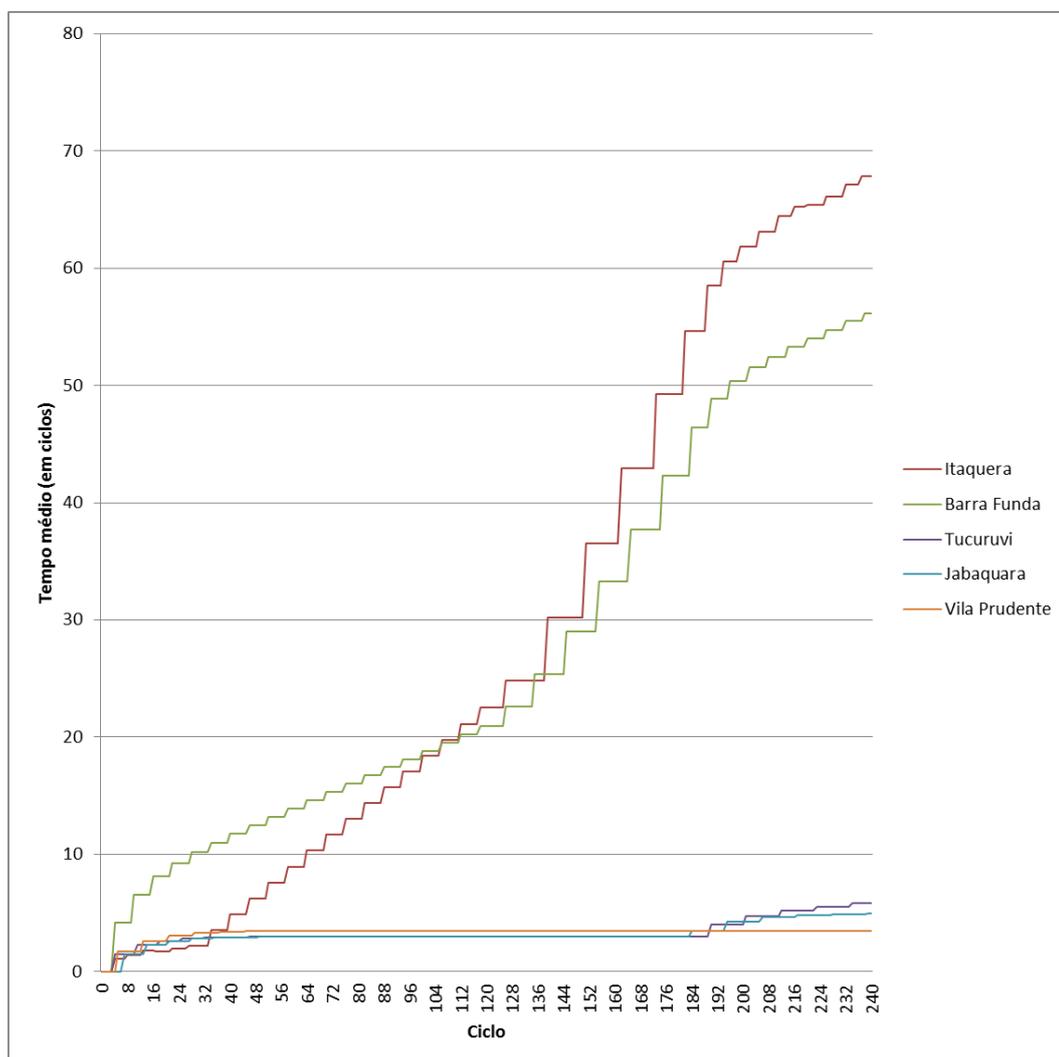


de uma situação de operação normal, sem acúmulo de usuários nas estações, passa para uma situação de crescimento no número de usuários, denotada pelo aumento do tempo médio de espera a partir do acionamento da intervenção.

Também acompanha o acionamento e desligamento das intervenções o fluxo de passageiros nas conexões (gráfico da figura 27). O aumento de usuários nas conexões saindo da linha Vermelha aumenta a partir do acionamento da intervenção nesta linha e, em seguida, o comportamento muda novamente quando a intervenção na linha é desativada e a intervenção da linha Azul é acionada. Note que a situação não volta para o cenário inicial, porque ali já é possível observar também a modificação causada por esta nova intervenção (ciclo 180). Curioso observar que a distribuição do fluxo de usuários nas conexões passa a se aproximar (com volume de usuários semelhante), principalmente nas conexões Sé Azul - Sé Vermelha, Sé Vermelha - Sé Azul, e República Amarela - República Vermelha. Isto porque os usuários, com a nova situação, passam a evitar a linha Azul, preferindo então a linha Vermelha para a realização de sua viagem.

Desta forma temos então a visualização da evolução da linha de acordo com os

Figura 26 – Gráfico - Cenário 4: Evolução do tempo médio de espera na estação

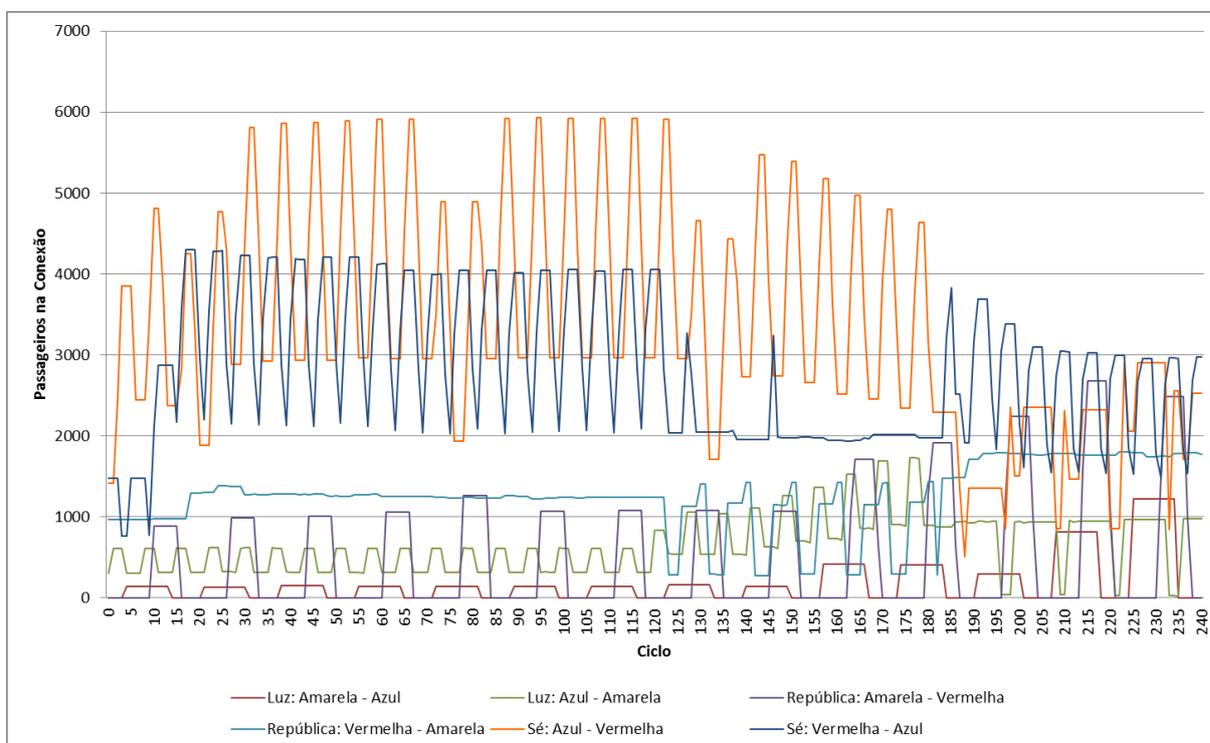


comportamentos de usuário e intervenções ocorridas. Vale observar que o comportamento esperado foi de acordo com os cenários anteriores, indicando o adequado tratamento de múltiplas situações pelo modelo proposto.

5.2.5 Cenário 5: Simulação Completa com Comportamento Estático

Neste cenário, o cenário anterior é replicado, com uma mudança fundamental no comportamento do usuário “Conservador”. Enquanto o comportamento padrão define que o usuário com este tipo de comportamento, irá escolher a melhor rota disponível no momento em que entrar na simulação (apesar de não alterá-la no decorrer da simulação), este cenário prevê que o usuário “Conservador” nunca mudará de rota, utilizando aquela definida como melhor rota na criação da simulação. Desta forma, pretende-se verificar os

Figura 27 – Gráfico - Cenário 4: Passageiros em conexões por ciclo



efeitos da falta de informação por parte dos usuários acerca da situação do sistema, uma vez que a situação da linha não influenciará um usuário entrante.

Sendo assim, também foi utilizada a configuração básica com as duas intervenções especificadas no cenário anterior, uma na linha Vermelha no ciclo 120 e outra no ciclo 180 na linha Azul (com o término da intervenção na linha Vermelha ocorrendo neste ciclo).

A configuração dos comportamentos de usuário seguirá a mesma proporção do cenário anterior, mudando apenas a forma como o comportamento “Conservador” decide sua rota. A definição desses comportamentos seguirá o método usado no cenário anterior, com a atribuição sendo feita de maneira aleatória na criação das instâncias referentes aos usuário. Sendo assim, a distribuição dos usuários é feita da seguinte forma:

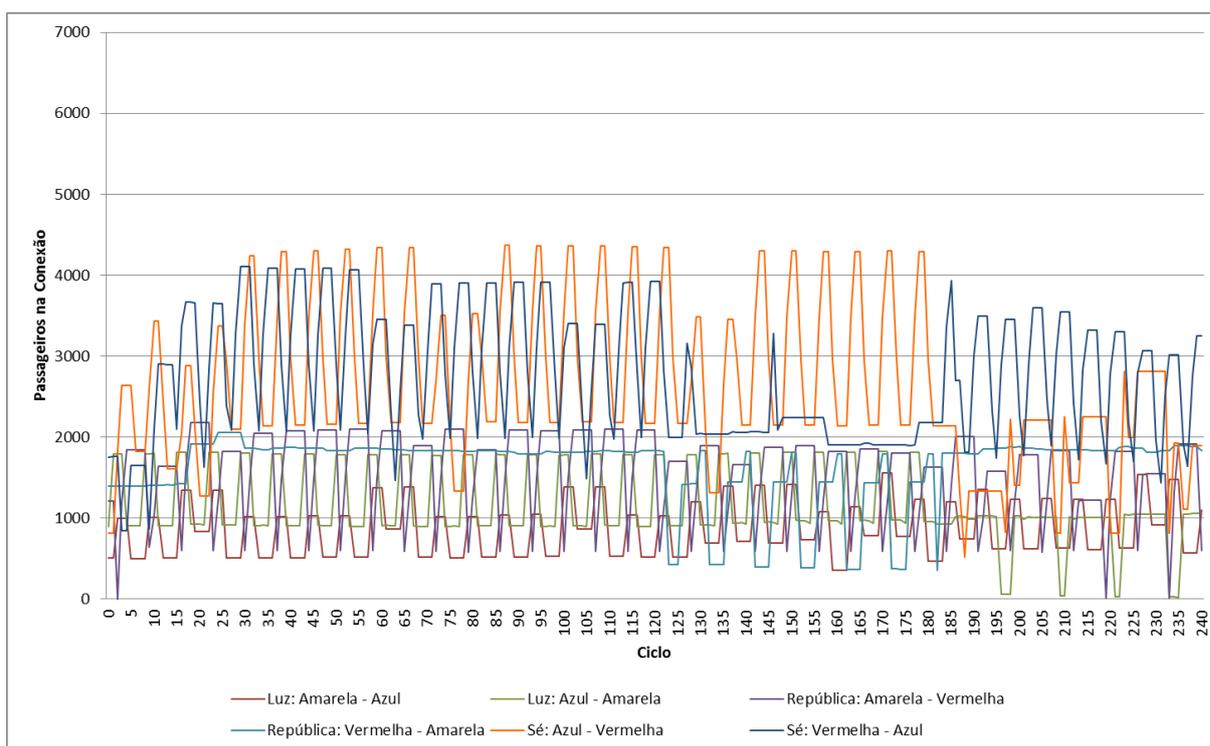
- 50% apresentarão o comportamento *Conservador* - Utilizará a melhor rota considerando o cenário padrão, desconsiderando eventuais mudanças na linha.
- 25% apresentarão o comportamento *Agressivo* - Mudarão a rota definida na entrada sempre que houver alguma alteração na simulação.
- 25% apresentarão o comportamento *Moderado* - Poderão mudar ou não a rota defi-

nida na entrada da simulação. No nosso caso, a chance de alteração foi definida em 50%.

A distribuição dos usuários, portanto, não apresentou diferenças em relação ao cenário anterior, já que temos a proporção de 50% / 25% / 25% (*Conservador / Moderado / Agressivo*).

As rotas definidas nos três momentos (ciclo 0, ciclo 120 e ciclo 180) seguem a mesma estrutura vista no cenário anterior. As diferenças aparecem nos fluxos. É possível notar que, apesar de haver queda, os fluxos na linha Vermelha e linha Azul, na ocorrência das intervenções, ficam mais intensos em relação a simulação anterior (gráfico da figura 28). Isto porque, apesar das linhas não serem atrativas, uma parcela dos usuários ainda as mantém como escolha para seu trajeto.

Figura 28 – Gráfico - Cenário 5: Passageiros em conexões por ciclo



Outro ponto que não houve mudanças significativas foi no tempo de espera nas estações dentro do intervalo estudado. Isto porque o fluxo de entrada e capacidade de absorção dos trens continua o mesmo nas estações verificadas (sendo, todavia, o impacto observado nas estações de conexão, pelas alterações de fluxo expostas anteriormente).

5.2.6 Cenário 6: Simulação com Inclusão de Nova Linha

Neste cenário, será adicionada uma nova linha, de forma a validar uma das funções do modelo, que é a identificação dos efeitos causados por mudanças efetuadas no sistema, a partir da comparação entre o fluxo antes e após tais mudanças.

Para cumprir tal objetivo, será adicionada uma versão adaptada da prevista linha 6 - Laranja. Tal linha prevê a ligação entre as linhas Azul, Vermelha e Amarela. No caso da linha Azul, está prevista a ligação com a estação São Joaquim. Já com a linha Vermelha, a ligação não será direta, sendo feita pela estação Água Branca da CPTM, próxima à estação Barra Funda. Já com a linha Amarela, a ligação será feita a partir da estação Higienópolis - Mackenzie, entre as estações República e Paulista.

A ligação com a linha Vermelha, para efeitos desta simulação, será feita considerando uma conexão com a estação Barra Funda, com 20 ciclos para a transição. Já a ligação com a linha Amarela será feita adicionando a nova estação (todavia, não serão feitas alterações nas definições de caminhos). O método para a estimativa das distâncias será feita com base na distância em linha reta entre os pontos das estações. A tabela 16 apresenta as estações e distâncias das estações da linha 6 - Laranja. Já a tabela 17 mostra a configuração da linha Amarela, com o acréscimo da estação Higienópolis.

Tabela 16 – Cenário 6: Configuração simplificada da linha 6 - Laranja

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
Água Branca - Higienópolis	4.600	184
Higienópolis - São Joaquim	2.000	80
TOTAL	6.600	264

Tabela 17 – Cenário 6: Configuração da linha 4 - Amarela com a inclusão da estação Higienópolis

Trecho	Distância (em metros)	Distância (em células)
Luz - República	1.200	48
República - Higienópolis	1.200	48
Higienópolis - Paulista	1.100	44
Paulista - Faria Lima	3.600	144
Faria Lima - Pinheiros	1.000	40
Pinheiros - Butantã	850	34
TOTAL	8.950	358

Então as configurações de número de trens, distância mínima e outros parâmetros

serão mantidos para a linha 4. Já para a linha 6 - Laranja, os valores foram adicionados usando como base também a linha 2 - Verde. A tabela 18 apresenta os valores utilizados para a configuração da linha.

Tabela 18 – Cenário 6: Parâmetros utilizados para a linha 6 - Laranja

Parâmetro	Valor
Número Máximo de Trens	10
Velocidade (em células por ciclo)	13
Distância mínima entre trens (em células)	47
Tempo de parada na estação	1
Comprimento do trem (em células)	6
Capacidade do trem (em passageiros)	1.749

Este cenário será analisado partindo dos resultados do quarto cenário. Então, serão observados as movimentações nas conexões, tanto as analisadas no cenário anterior, quanto as novas.

Temos dois gráficos disponíveis: o gráfico da figura 29 mostra as conexões presentes nas outras simulações. É possível verificar que há alterações no volume de usuários e o fluxo de usuários passa a ficar bem próximo, implicando numa melhor distribuição de usuários no sistema.

Já o gráfico da figura 30 mostra o fluxo de usuários nas novas conexões. A maior concentração se encontra nas estações Higienópolis e São Joaquim, justamente pela localização centralizada, servindo em um número maior de casos como rota alternativa. Já a conexão entre Barra Funda e Água Branca se mostra pouco utilizada. Isto porque a mesma possui um custo bem alto em relação ao restante do sistema, já que o tempo de travessia foi definido de forma a se equivaler à ligação feita por trem. Tal conexão só passa a ser mais utilizada no intervalo das intervenções na linha Vermelha, que acaba por torná-la mais interessante.

A implementação feita da linha Laranja foi bem simplificada, afinal, foram consideradas apenas as conexões. Então, neste cenário é como se o papel da linha fosse apenas de transição, e não de captação de passageiros, o que explica sua baixa demanda. Caso fossem implementadas as demais estações, em conjunto com o refinamento da alimentação, modificando os dados utilizados para alimentar a simulação para considerar entradas e saídas nestas estações, certamente a linha e respectivas conexões passariam a ser mais exigidos, porém perderia-se a relação de causa e efeito direta sobre o restante das linhas, como observado aqui, já que não seria direta a relação entre as novas estações

Figura 29 – Gráfico - Cenário 6: Passageiros em conexões por ciclo

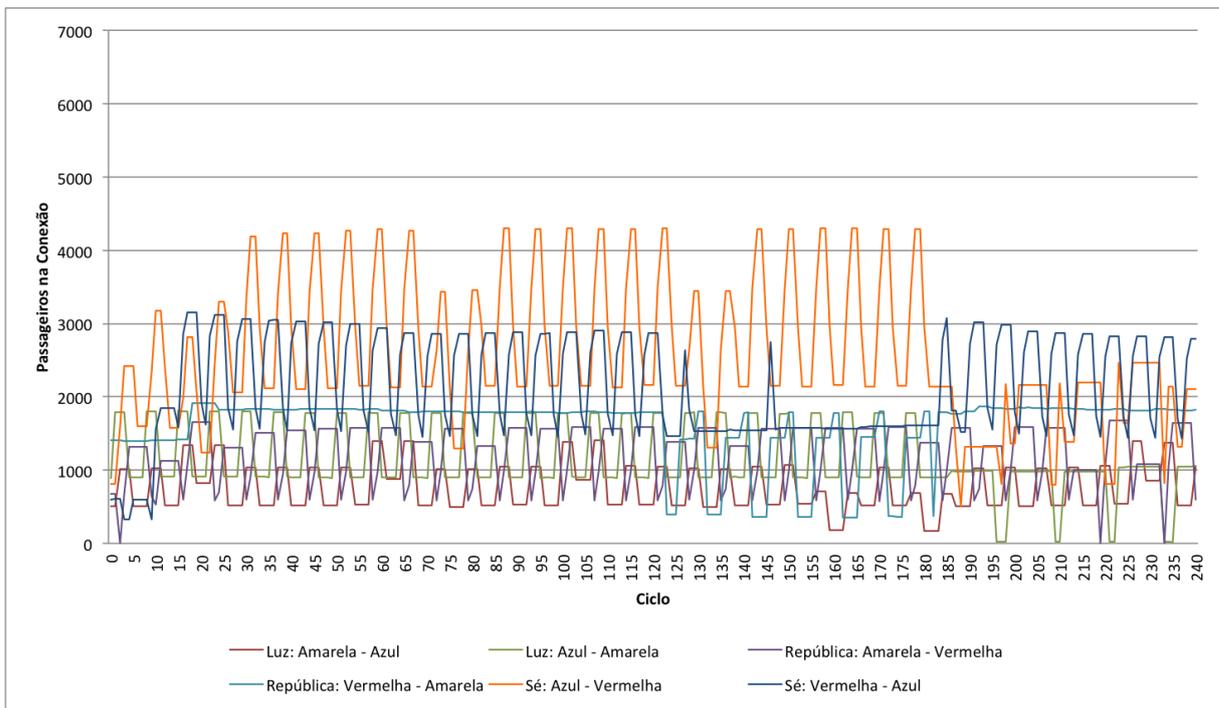
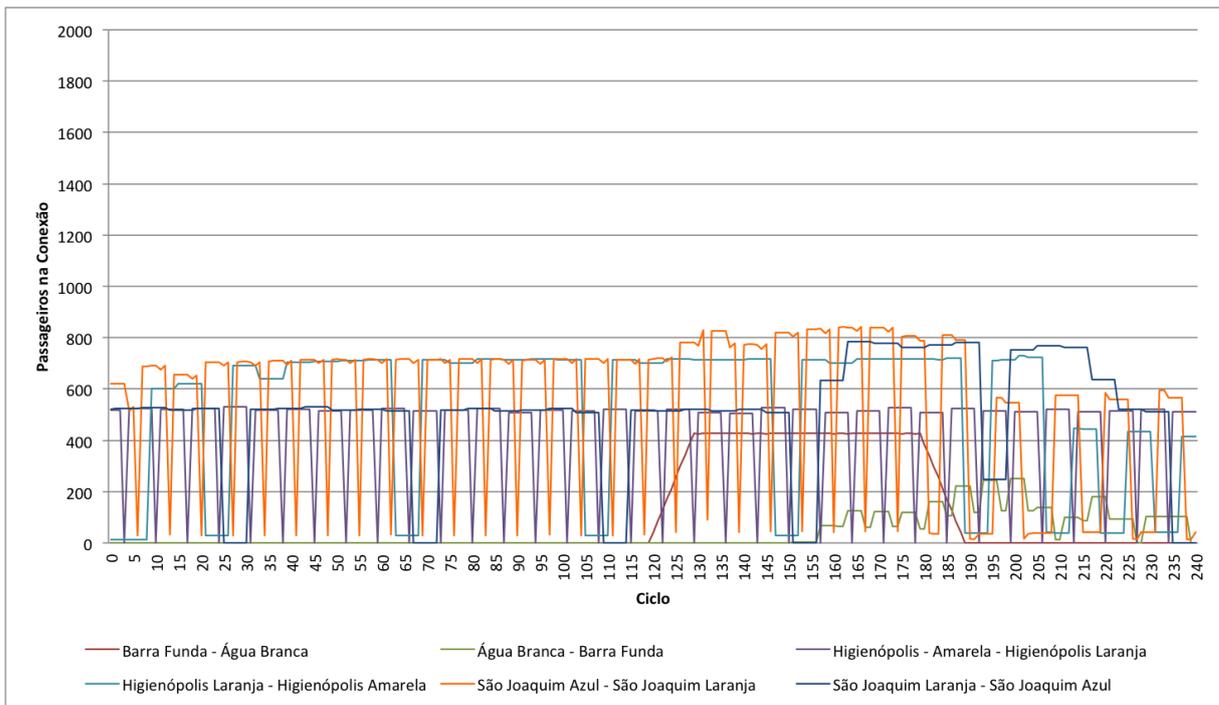


Figura 30 – Gráfico - Cenário 6: Passageiros em conexões por ciclo - Higienópolis, Barra Funda e São Joaquim



e rotas possíveis. Não seria possível então determinar se um fluxo foi causado pelos novos usuários ou pela existência das novas rotas.

É certo que, para o estudo de uma nova linha, este novo fluxo de usuários deverá ser levado em conta, uma vez que, havendo disponibilidade, a tendência é de um maior número de usuários passar a usar o sistema. Porém é necessário o uso de informações demográficas e outros tratamentos dos dados que fogem do escopo deste trabalho.

5.2.7 Considerações sobre os Resultados

Os resultados observados condizem com o esperado para o modelo em questão. Também foi possível observar os tipos de dados passíveis de extração e análises possíveis sobre estes dados. Ainda, vale observar que a extração de dados não é limitada ao analisado, cabendo ao desenvolvedor criar novos arquivos de log durante a execução expondo dados que julgue pertinente para sua análise.

Sobre os dados observados, o gráfico 31 sumariza o tempo médio de deslocamento para todos os cinco cenários. É notável o aumento entre os tempos observados entre o cenário 1 e cenário 2, uma vez que neste cenário é ativada a intervenção na linha Vermelha. É interessante observar os efeitos causados pelo grau de conhecimento do usuário sobre a situação do sistema de transporte.

O cenário 4, por sua vez, por misturar os perfis, apresenta uma redução parcial, entre o observado no cenário 2 e cenário 3. Já o cenário 5, com a remoção da capacidade de conhecimento do melhor caminho para a situação de uma parcela dos usuários (metade dos usuários) causou um aumento significativo no tempo de deslocamento, praticamente se igualando ao cenário 2, e, só não o ultrapassando porque ainda havia usuários capazes de se adaptar às intervenções no trajeto (com os comportamentos “Moderado”, que no caso, ou recalcula o caminho ou utiliza o melhor caminho disponível na entrada e “Agressivo”, que sempre possui o caminho mais rápido para o momento).

A partir dos cenários 3, 4 e 5 é possível vislumbrar a importância do usuário possuir algum conhecimento sobre a situação do sistema. A partir do momento que o usuário é capaz de saber as melhores rotas para atingir o seu destino, maior será a qualidade do seu deslocamento, uma vez que conseguirá chegar ao seu destino no menor tempo possível. Tal informação pode ser disponibilizada para o usuário de diversas formas, desde a utilização de avisos nas estações, até mecanismos mais sofisticados, fazendo uso, por exemplo, de celulares, para a notificação de condições do trajeto.

Por fim, a entrada de uma linha adicional, que permite concluir que, mesmo uma linha com poucas saídas como a desenhada, há uma redução significativa no tempo médio de deslocamento, levando a concluir que um maior número de alternativas permite maior adaptação do sistema a situações adversas.

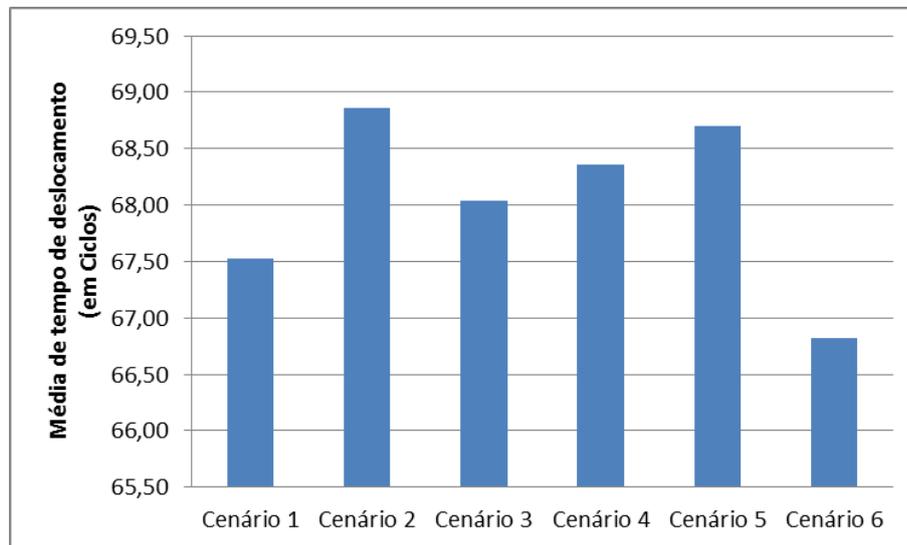


Figura 31 – Tempo médio de deslocamento no período e cenários estudados

Sobre o metrô de São Paulo, a riqueza do mecanismo de rotas e impactos gerados é menor, visto que não há muitas possibilidades de caminhos alternativos. De fato, as conexões entre linhas e a possibilidade de ir por um novo caminho se concentra, essencialmente na região central, nas conexões estudadas no cenário. Uma vez que se tenha mais possibilidades de caminhos, outras situações podem ser observadas e a dinâmica dos usuários se torna mais rica (além de uma melhor distribuição de usuários pelo sistema de transporte, naturalmente).

6 Conclusões

O presente trabalho teve por objetivo apresentar um modelo computacional para a simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos meios, em conjunto com um *framework* para o desenvolvimento de simulações utilizando este modelo.

A abordagem aqui utilizada foi a utilização de sistemas envolvendo, principalmente modelagens microscópica e mesoscópica e, para a construção do usuário do sistema, agentes inteligentes, com comunicação entre o sistema e usuário feita a partir de eventos.

Foram feitas, de forma a direcionar o modelo aqui proposto, duas revisões sistemáticas: a primeira, procurando identificar quais os principais modelos de simulação de sistemas de transporte envolvendo múltiplos meios, e outra visando identificar como o processo de decisão do usuário é feito em simulações.

O modelo aqui proposto foi construído a partir dos conceitos apresentados nos trabalhos de Barceló (2010) e Rodrigue, Comtois e Slack (2007) e Órtuzar (2011).

Com base no estudo da referida literatura, foi feita a construção do modelo em si, a partir do qual foi construído um *framework*, este em conjunto com a implementação de um modo: transporte sobre trilhos. A escolha foi feita tendo em mente o sistema de transporte da cidade de São Paulo e a pesquisa Origem-Destino, realizada pela Companhia do Metropolitano de São Paulo, com a identificação do fluxo de usuários no sistema de transporte da cidade.

Foram consideradas na construção do modelo principalmente a modularidade e capacidade de extensão, permitindo a utilização com diversos modais combinados. Estas características podem ser evidenciadas pela implementação efetuada, onde há independência de operação entre as linhas configuradas no modelo.

A verificação do modelo proposto foi feita a partir da construção de cinco cenários diferentes: a utilização do sistema em seu estado mais simples, com o usuário configurado para ter um comportamento “Conservador”, e o sistema funcionando sem nenhum tipo de intervenção.

O segundo cenário, envolveu a inserção de intervenções em uma das linhas, e a verificação dos efeitos causados. O terceiro cenário, por sua vez, tratou da configuração do usuário para apresentar comportamento “Agressivo”, onde, a cada mudança de situação

no sistema de transporte, a melhor rota é verificada, representando o usuário plenamente ciente (seja por notificações ou orientação nas estações) da situação do meio de transporte.

O quarto cenário foi construído usando o mesmo cenário, porém com os três tipos de comportamento ativos (“Agressivo”, “Moderado” e “Conservador”). O quinto cenário foi construído para avaliar os custos que a falta de informação por parte do usuário pode ter no tempo total de deslocamento, servindo de indicativo da importância dos operadores das linhas em manterem seus usuários bem informados quanto as melhores rotas ao longo do dia. Por fim, no sexto cenário, foi feita a utilização das mesmas configurações do quarto cenário, porém com a inclusão de uma nova linha, de forma a identificar os efeitos de novas opções de caminho no sistema.

Além de verificar que as características do modelo computacional proposto prestam ao objetivo aqui exposto, também foi possível identificar indícios dos efeitos causados por usuários mais cientes das condições do sistema para a eficiência e conforto do sistema. Ainda, o modelo aqui proposto mostra-se como uma ferramenta adequada para a identificação de efeitos da inclusão de novas linhas e caminhos dentro de um sistema.

A seguir, são apresentadas as principais contribuições deste trabalho, assim como propostas de trabalhos futuros e evoluções do que aqui foi feito.

6.1 Principais Contribuições

Este trabalho se propôs a apresentar um modelo computacional para o desenvolvimento de aplicativos para simulação de sistemas de transporte, em conjunto com um *framework* para o desenvolvimento de simulações utilizando este modelo. Assim, além da descrição do modelo, há também os artefatos referentes ao *framework* desenvolvido, além de um exemplo de aplicação utilizando transporte sobre trilhos.

O modelo aqui proposto permite a simulação de sistemas de transporte modularizadas, com independência de implementação, e ao mesmo tempo, comunicação entre as partes. Com isso é possível a criação de simulações envolvendo, não apenas um meio de transporte, mas todo o sistema disponível em centros urbanos.

A implementação feita permite a utilização de simulações microscópicas e simulações mesoscópicas nativamente, bastando o dimensionamento do usuário (indivíduo ou agrupamentos). Ainda, pela flexibilidade e modularidade, é possível também a utilização de métodos macroscópicos, bastando para tal a implementação deste mecanismo.

Ainda, temos a implementação funcional de um modal, o sistema de transporte sobre trilhos. Apesar de trabalharmos apenas com o Metrô de São Paulo, é possível a utilização do mesmo módulo, bastando apenas que a configuração adequada seja feita, para a utilização com demais modos sobre trilhos, como trens, monotrilhos, entre outros.

Tal implementação faz uso de autômatos celulares unidimensionais para a representação do sistema de transportes sobre trilhos, com controle de velocidade e de intervenções (e respectiva adaptação) a estas ações.

Ainda, foi proposta uma abordagem baseada em agentes inteligentes reativos para o comportamento do usuário. Tal abordagem foi tratada em um primeiro nível, focado no contexto de transporte sobre trilhos, todavia o modelo aqui proposto permite a extensão e inclusão de novos comportamentos.

O comportamento do usuário aqui implementado permite também a identificação dos efeitos da utilização de uma rede de informações aplicada ao sistema de transportes, permitindo que o usuário saiba sempre qual o melhor caminho a ser tomado. Isto diminui o tempo de deslocamento e melhora o fluxo de usuários por todo o sistema, reduzindo os efeitos estressantes da superlotação.

O modelo aqui proposto também permite responder a uma questão: como mensurar os efeitos de uma determinada ação ou inclusão no sistema. Isso, tanto pensando na modificação da velocidade de uma linha, inclusão ou remoção de trens, ou mesmo a criação de novas linhas, ligando pontos críticos.

A implementação feita, a despeito de utilizar a linguagem Java, procurou ater-se aos princípios fundamentais da Orientação a Objetos, de forma a permitir a transcrição do desenvolvimento para outras linguagens orientadas a objetos sem que sejam necessárias grandes mudanças nos fundamentos por este trabalho propostos.

O trabalho permitiu o desenvolvimento de dois artigos, publicados. O primeiro apresenta a revisão sistemática realizada (MORAIS; DIGIAMPIETRI, 2012) e o segundo apresenta a simulação de sistemas de transporte sobre trilhos utilizando autômatos celulares desenvolvida até o final de 2013 (MORAIS; DIGIAMPIETRI,).

Ainda, seguido a este trabalho, será redigido um artigo tratando dos principais aspectos do modelo computacional aqui construído, resumizando o trabalho realizado.

6.2 Trabalhos Futuros

Durante o desenvolvimento do trabalho, foram identificadas diversas possibilidades de continuidade e evolução do modelo aqui proposto, de forma a criar, não apenas novas possibilidades de simulação, como também possíveis evoluções do modelo proposto.

A validação mais apurada do modelo proposto, utilizando dados mais próximos e diretos do resultado da pesquisa Origem-Destino, é uma das melhorias previstas. Apesar de usarmos dados desta pesquisa, ela utiliza diversas zonas as quais não necessariamente o Metrô representa o melhor caminho para o usuário (ou mesmo a combinação entre Metrô e outros modais faz-se necessária). Desta forma, há duas formas essenciais para a validação e comparação com a pesquisa em si.

A primeira envolve o tratamento dos dados de forma a adaptá-los para a obtenção dos fluxos que de fato envolvam as entradas e saídas nas estações. Para tal, seria preciso, por exemplo, aprofundar a análise da Pesquisa Origem-Destino, envolvendo as informações sobre múltiplos modais. Tal análise e tratamento foge do escopo deste trabalho, por isso a sugestão como trabalhos futuros.

A segunda forma consiste na implementação de outros modais (e a configuração no cenário de modais já previstos, como o sistema de ferrovia), o torna possível a utilização dos dados da pesquisa Origem-Destino na forma mais pura possível. Desta forma, seria necessária a implementação de modais que atendam as diversas zonas apresentadas, permitindo que os mesmos colem os usuários oriundos de tais locais. São modais prioritários os sistemas de corredores de ônibus e BRTs (*Bus Rapid Transit*), por exemplo, considerando o contexto de sistema público de transporte¹.

A implementação aqui apresentada não faz uso de paralelismo. De forma a aumentar a eficiência acerca do volume de dados tratado e tempo de execução, é importante a implementação utilizando este recurso. Dado o mecanismo de ciclos, um caminho para a utilização de paralelismo é a adaptação das operações dentro de um ciclo para ocorrerem de forma simultânea, uma vez que cada sistema pode ser executado de forma majoritariamente independente, com atenção para a entrada e saída entre os diversos sistemas. Todavia, seria preciso um estudo detalhado sobre as técnicas de paralelismo existentes para a utilização daquela que mais se adequa a simulação proposta.

Outra melhoria a ser feita é na implementação das conexões. Aqui, foi utilizada

¹A pesquisa Origem-Destino também apresenta dados referentes a transporte individual, mas não se aprofunda nesse modal.

uma abordagem simples, baseado em filas. Todavia, não necessariamente este mecanismo abarca todas as situações, já que o deslocamento pode ser afetado, por exemplo, pela concentração de usuários (trabalhos sobre deslocamento de multidões em ambientes fechados podem dar pistas sobre possíveis implementações).

A inclusão de mais uma camada de abstração pode se mostrar útil, quando a simulação for feita utilizando as zonas e, em determinada zona, houver mais de um nó de entrada / saída disponível. Assim, seria necessária a implementação de uma estrutura para a representação deste tipo de situação (e o respectivo tratamento na construção de rotas).

Na mesma linha, a definição do caminho do usuário pode ser melhorada com a inclusão de mais aspectos a serem considerados no processo de decisão, aproximando do observado na revisão sistemática e em mecanismos mais refinados expostos por Órtuzar (2011). O presente trabalho não trata por exemplo, de aspectos como o objetivo do deslocamento, variáveis de conforto, entre outras, como o previsto pelo *Muddling Through*. A utilização de tal refinamento se torna especialmente importante com a inserção de mais modais, onde há uma riqueza maior de caminhos e modais disponíveis. Considerando apenas o Metrô, há poucas rotas possível e, portanto, não seria possível verificar e validar os benefícios de uma abordagem mais detalhada nesse sentido. A implementação deste recurso pode ser feita a partir da extensão da classe *User* e a reimplementação dos métodos responsáveis por este (re-)cálculo.

6.3 Considerações Finais

Este trabalho de forma alguma resolve todas as questões relacionadas a simulação de sistemas de transporte. O que se propôs aqui é uma estrutura básica para a criação de simulações envolvendo múltiplos meios de transporte, tipo de simulação com poucas abordagens previstas na literatura, conforme exposto na revisão aqui feita.

O comportamento do modelo aqui proposto se mostrou dentro do esperado, possibilitando a visualização dos fluxos de usuários dentro do sistema e, também, a identificação dos efeitos causados por mudanças que podem ser feitas para a melhoria do sistema de transporte em questão ou mesmo de problemas que podem ocorrer durante a operação. Há um conjunto de melhorias a serem feitas, principalmente com relação a abrangência da simulação, com outros modos e também modificações referentes à melhora no desempenho computacional, com o uso de paralelismo, por exemplo, porém a estrutura do modelo

mostra-se suficiente para prover esta característica de múltiplos meios.

Também, os dados da pesquisa Origem-Destino, para o sistema aqui simulado, se mostraram suficientes para a proposta. Todavia, mostra-se interessante a inclusão de novas questões na pesquisa, que envolvam principalmente a possibilidade de se descobrir, de fato, quais são os perfis e comportamentos de usuários dentro do sistema. O quão propensos eles estão a escolher uma nova rota e quais os fatores que levam em conta nesta decisão.

Por fim, sugerimos que o trabalho aqui apresentado seja continuado, pelos resultados adequados observados e pelas lacunas identificadas na revisão da literatura a respeito de softwares que atendam aos requisitos aqui expostos. Apesar de ainda ter muitas evoluções previstas, enxergamos o potencial do modelo aqui proposto e discutido neste trabalho para se tornar uma alternativa considerável para a simulação de múltiplos meios de transporte. Para facilitar esta continuidade iremos disponibilizar todos os códigos fontes desenvolvidos.

Referências

- AFSHORDI, N.; MEYBODI, M. Using learning automata for tuning fuzzy membership functions in learning driver preferences. In: *International Conference on Intelligent and Advanced Systems*. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2007. p. 87–92.
- AL-NASUR, S.; KACHROO, P. A microscopic-to-macroscopic crowd dynamic model. In: *Intelligent Transportation Systems Conference*. Toronto, Canada: [s.n.], 2006. p. 606–611.
- BAE, C.-H. et al. Multi-agent based traffic simulation and integrated control of freeway corridors: Part 1 simulation and control model. *Journal of Mechanical Science and Technology*, The Korean Society of Mechanical Engineers, v. 23, p. 1365–1373, 2009. ISSN 1738-494X. 10.1007/s12206-008-1109-y. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s12206-008-1109-y>>.
- BARCELÓ, J. (Ed.). *Fundamentals of Traffic Simulation*. New York, USA: Springer, 2010. ISBN 978-1-4419-6141-9.
- CHAURASIA, G. et al. Virtual chaotic traffic simulation. In: *7th Indian Conference on Computer Vision, Graphics and Image Processing*. Chennai, India: ACM, 2010. p. 337–344. ISBN 978-1-4503-0060-5. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1924559.1924604>>.
- CHEN, M.; BÄRWOLFF, G.; SCHWANDT, H. A study of step calculations in traffic cellular automaton models. In: *13th International Intelligent Transportation Systems IEEE Conference*. Funchal, Portugal: [s.n.], 2010. p. 747–752.
- COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO. *Site da Companhia do Metrô*. 2014. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br>>.
- COORDENADORIA DE PESQUISA E AVALIAÇÃO DE TRANSPORTE. *Pesquisa Origem e Destino*. São Paulo, BR: Companhia do Metrô, 2007. Disponível em: <<http://www.metro.sp.gov.br/metro/numeros-pesquisa/pesquisa-origem-destino-2007.aspx>>.
- ESTEVEVES, E. et al. Conceptualization and implementation of a microscopic pedestrian simulation platform. In: *ACM symposium on Applied Computing*. Honolulu, Hawaii: ACM, 2009. p. 2105–2106. ISBN 978-1-60558-166-8. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1529282.1529748>>.
- ESTEVEVES, E.; ROSSETTI, R.; OLIVEIRA, E. *A Software Environment for Microscopic Pedestrian Simulation*. 2009. Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/15123>>.

- GAO, L. et al. A delay model of pedestrian-vehicle system on two crossings. In: *5th Advanced Forum on Transportation of China*. Beijing, China: [s.n.], 2009. p. 192–198.
- GERÊNCIA DE OPERAÇÕES. *Por dentro da operação do Metrô*. São Paulo, BR: Companhia do Metropolitano de São Paulo, 2013.
- HELBING, D.; MÓLNAR, P. Social force model for pedestrian dynamics. *Physical Review E*, v. 51, p. 4282–4286, 1995.
- HUANG, L.; WU, J. Fuzzy logic based cyclists' path planning behavioral model in mixed traffic flow. In: *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*. Beijing, China: [s.n.], 2008. p. 275–280.
- HUANG, L.; WU, J. Cyclists' path planning behavioral model at unsignalized mixed traffic intersections in china. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, v. 1, n. 2, p. 13–19, 2009.
- HUIXIN, W.; WENHONG, W. Microscopic dynamic simulation model for pedestrian-vehicle mixed traffic. In: *International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies*. Shenzhen, China: [s.n.], 2010. v. 1, p. 153–156.
- JIN, X.; WHITE, R. An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns. *Computers, Environment and Urban Systems*, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 398–411, 2012.
- KAY, J. *Obliquity: Why our Goals are Best Achieved Indirectly*. London, UK: Profile Books, 2010.
- KLÜGL, F.; RINDSFÜSER, G. Large-scale agent-based pedestrian simulation. In: PETTA, P. et al. (Ed.). *Multiagent System Technologies*. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2007, (Lecture Notes in Computer Science, v. 4687). p. 145–156. ISBN 978-3-540-74948-6.
- KLÜGL, F.; BAZZAN, A. L. C. Simulation of adaptive agents: learning heuristics for route choice in a commuter scenario. In: *1st international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*. Bologna, Italy: ACM, 2002. p. 217–218. ISBN 1-58113-480-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/544741.544795>>.
- KRETZ, T. et al. Quickest paths in simulations of pedestrians. *Advances in Complex Systems*, v. 14, n. 5, p. 733–759, 2011.
- KRISTOFFERSSON, P.; ALONSO, E. Experimental comparison of rational choice theory, norm and rights based multi agent systems. In: AKOKA, J. et al. (Ed.). *Perspectives in Conceptual Modeling*. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2005, (Lecture Notes in Computer Science, v. 3770). p. 182–191. ISBN 978-3-540-29395-8.
- LATTNER, A.; DALLMEYER, J.; TIMM, I. Learning dynamic adaptation strategies in agent-based traffic simulation experiments. In: KLÜGL, F.; OSSOWSKI, S. (Ed.). *Multiagent System Technologies*. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2011, (Lecture Notes in Computer Science, v. 6973). p. 77–88. ISBN 978-3-642-24602-9.
- LINDBLÖM, C. E. The science of "muddling through". *Public Administration Review*, v. 19, p. 79–88, 1959.

- LIORIS, E.; COHEN, G.; FORTELLE, A. de L. Overview of a dynamic evaluation of collective taxi systems providing an optimal performance. In: *IV IEEE Intelligent Vehicles Symposium*. San Diego, USA: [s.n.], 2010. p. 1110–1115.
- MA, J. et al. Dynamic features of pedestrian-vehicle counter flow conflicts. *3rd International Conference on Transportation Engineering*, Chengdu, China, p. 697–702, 2011.
- MA, W.; MA, W.; YANG, X. Development and evaluation of a fuzzy logic control approach for pedestrian crossing. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008. v. 1, p. 882–886. ISBN 978-0-7695-3357-5.
- MA, W.; YANG, X. Signal coordination models for midblock pedestrian crossing and adjacent intersections. In: *2nd International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. v. 2, p. 193–196. ISBN 978-0-7695-3804-4-2. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICICTA.2009.284>>.
- MANDIAU, R. et al. Behaviour based on decision matrices for a coordination between agents in a urban traffic simulation. *Applied Intelligence*, Springer Netherlands, v. 28, p. 121–138, 2008. ISSN 0924-669X. 10.1007/s10489-007-0045-3. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10489-007-0045-3>>.
- MORAIS, D. M. G.; DIGIAMPIETRI, L. A. Simulação de transportes sobre trilhos usando autômatos celulares para os trens e agentes inteligentes para os usuários. *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação*, Londrina, Brasil.
- MORAIS, D. M. G.; DIGIAMPIETRI, L. A. Uma revisão acerca dos métodos de simulação envolvendo transporte multimodal. *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, v. 10, p. 2–9, 2012.
- NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal of Physics I*, v. 2, p. 2221–2229, 1992.
- PAN, M. et al. Microscopic simulation research on signal cycle length of mixed traffic considering violation. In: *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010. v. 2, p. 674–678. ISBN 978-0-7695-4077-1. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/ICICTA.2010.658>>.
- PARUCHURI, P.; PULLALAREVU, A. R.; KARLAPALEM, K. Multi agent simulation of unorganized traffic. In: *1st international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 1*. Bologna, Italy: ACM, 2002. p. 176–183. ISBN 1-58113-480-0. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/544741.544786>>.
- PIPES, L. A. An operational analysis of traffic dynamics. *Journal of Applied Physics*, v. 24, p. 274–287, 1953.
- RADECKÝ, M.; GAJDOS, P. Intelligent agents for traffic simulation. In: *Spring simulation multiconference*. Ottawa, Canada: Society for Computer Simulation International, 2008. p. 109–115. ISBN 1-56555-319-5. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1400549.1400563>>.

- REUSCHEL, A. Vehicle movements in a platoon with uniform acceleration or deceleration of the lead vehicle. *Zeitschrift des Osterreichischen Ingenieur und Architekten Vereines*, v. 95, p. 59–62, 1950.
- RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. *The Geography of Transport System*. New York, USA: Routledge, 2007.
- ROTHKRANTZ, L. J. M. Dynamic routing using the network of car drivers. In: *Euro American Conference on Telematics and Information Systems: New Opportunities to increase Digital Citizenship*. Prague, Czech Republic: ACM, 2009. p. 11:1–11:8. ISBN 978-1-60558-398-3. Disponível em: <<http://doi.acm.org/10.1145/1551722.1551733>>.
- ÓRTUZAR, L. G. W. Juan de D. *Modelling Transport*. 4. ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- SEELE, S.; HERPERS, R.; BAUCKHAGE, C. Cognitive agents for microscopic traffic simulations in virtual environments. In: HERRLICH, M.; MALAKA, R.; MASUCH, M. (Ed.). *Entertainment Computing*. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2012, (Lecture Notes in Computer Science, v. 7522). p. 318–325. ISBN 978-3-642-33541-9.
- SIMON, P. M.; NAGEL, K. Simplified cellular automaton model for city traffic. *Physical Review E*, American Physical Society, v. 58, p. 1286–1295, Aug 1998. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.58.1286>>.
- USHER, J.; LIU, X.; KOLSTAD, E. Simulation of pedestrian behavior in intermodal facilities. *Spring Simulation Multiconference*, San Diego, USA, 2010.
- WANG, L. et al. Mixed flow simulation at urban intersections: Computational comparisons between conflict-point detection and cellular automata models. In: *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. v. 2, p. 100–104. ISBN 978-0-7695-3605-7. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1109/CSO.2009.112>>.
- WANG, T.; CHEN, J. An improved cellular automaton model for urban walkway bi-directional pedestrian flow. In: *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. v. 3, p. 458–461. ISBN 978-0-7695-3583-8. Disponível em: <<http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1605398.1606732>>.
- WOOLDRIDGE, M. (Ed.). *An Introduction to Multiagent Systems*. Chichester, UK: Wiley, 2002.
- XIAOBEI, J.; HUI, X.; HONGWEI, G. Analysis of crowd behavior in route choice based on dynamic programming. *9th International Conference of Chinese Transportation Professionals: Critical Issues in Transportation System Planning, Development, and Management*, Harbin, China, v. 358, p. 742–750, 2009.
- XUE, Y. et al. Exploring jamming transitions and density waves in bidirectional pedestrian traffic. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, Springer, Berlin / Heidelberg, Germany, v. 69, p. 289–295, 2009. ISSN 1434-6028. 10.1140/epjb/e2009-00149-8. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1140/epjb/e2009-00149-8>>.