

A computational model for urban transportation systems simulation

Um modelo computacional para a simulação de sistemas de transporte urbano

Daniel Marques Gomes Morais¹, Luciano Antonio Digiampietri^{2*}

Resumo: 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 paper assumes 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 São Paulo's metro system for model testing, using data from the origin-destination survey for testing and validating the model here proposed.

Keywords: Simulation — Urban transportation — Decision making

Resumo: Atualmente, as dificuldades enfrentadas no deslocamento urbano são consideradas um problema extremamente importante, especialmente nas grandes cidades. O planejamento adequado do sistema de transporte urbano é essencial para minimizar o tempo e os custos de viagem, melhorar a qualidade de vida e melhorar o ambiente urbano. Este trabalho parte da premissa de que os sistemas de simulação podem ser utilizados para estudar diferentes alternativas para melhorar o sistema de transporte, de modo a melhor justificar a tomada de decisão e possibilitar uma otimização do deslocamento urbano. Assim, este trabalho apresenta a proposta e o desenvolvimento de um modelo computacional para simulação de sistemas de transporte urbano. O modelo proposto visa a simular modelos mesoscópicos e microscópicos, incluindo o comportamento dos usuários no planejamento de rotas. Uma estrutura para o desenvolvimento de aplicações de simulação é descrita, com uma implementação que usa como cenário o Metropolitano de São Paulo (Metrô), considerando os dados da pesquisa Origem-Destino para teste e validação do modelo aqui proposto.

Palavras-Chave: Simulação — Transporte urbano — Processo de decisão do usuário

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), São Paulo, SP, Brasil

²Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, SP, Brasil

*Corresponding author: digiampietri@usp.br

DOI: <https://doi.org/10.22456/2175-2745.80557> • Received: 25/02/2018 • Accepted: 08/07/2018

CC BY-NC-ND 4.0 - This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License.

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.

2. Fundamentação Teórica

Esta seção apresenta conceitos básicos de forma a fundamentar as decisões tomadas neste trabalho. Para tal, são apresentados os conceitos relativos à simulação de sistemas de transporte e ao processo de decisão do usuário no que diz respeito à forma de locomoção.

2.1 Modelos de simulação de meios de transporte

Segundo Barceló [1], a simulação de tráfego de veículos pode ser classificada em três categorias: microscópica, macroscópica e mesoscópica.

A simulação microscópica é “baseada na descrição do movimento de cada veículo que compõe o fluxo de tráfego” [1], e cada um dos componentes da simulação possuem um comportamento próprio, definido em função do ambiente e dos outros componentes. Neste tipo de simulação são observados parâmetros e ações como aceleração, frenagem, distância entre veículos e mudanças de faixas. Para veículos, o modelo é conhecido como *car-following*.

Já a simulação macroscópica é baseada na “teoria do fluxo de tráfego contínuo, cujo objetivo é a descrição da evolução no espaço tempo de variáveis que caracterizam fluxos macroscópicos: volume, velocidade e densidade” [1]. Ou seja, diferentemente da simulação microscópica, que observa o comportamento do indivíduo, a simulação macroscópica preocupa-se em simular o comportamento da massa, considerando um conjunto de veículos como uma unidade só, observando parâmetros como densidade, volume e velocidade (da massa). Normalmente, este tipo de simulação utiliza mecanismos de mecânica dos fluidos para a simulação destes comportamentos.

Por fim, a simulação mesoscópica “consiste na simplificação onde - enquanto captura os pontos essenciais da dinâmica - demanda menos dados e”, assim, “são mais eficientes computacionalmente em relação a modelos microscópicos” [1],

desta forma unindo elementos da abordagem microscópica com elementos da abordagem macroscópica.

Um sistema de transporte urbano pode ser construído utilizando dois principais elementos estruturais [2]: Nós e Ligações. Nós representam polos de atividades urbanas, relacionados a atividades econômicas e sociais fundamentais para o funcionamento da cidade (empresas, escolas, museus, etc), inclusos pontos de acessibilidade ao sistema de transporte (terminais de ônibus, estações de trem, aeroportos, etc). Ligações representam as infraestruturas que possibilitam o fluxo entre os nós (ruas e avenidas, corredores de ônibus, etc).

Ainda, Rodrigue, Comtois e Slack [2] classificam o transporte urbano em três categorias distintas: Transporte coletivo, que trata da mobilidade pública e acessível entre determinados pontos da cidade (ônibus, trens, etc); Transporte individual, cujo uso depende da decisão do indivíduo acerca de seu uso (carros, bicicletas, deslocamento a pé) e, por fim, o transporte de mercadorias, relativo ao deslocamento de produtos em um centro urbano.

2.2 O processo de decisão do usuário

Um dos aspectos principais acerca da modelagem e simulação de um sistema de transporte envolve a compreensão do processo de decisão do usuário em relação à definição da rota utilizada dentro do sistema. Segundo Ortúzar e Willumsen [3], há dois paradigmas principais sobre modelagem de tomada de decisões: *substantive rationality* [4] e *muddling through* [5].

O paradigma denominado *substantive rationality*, também chamado de abordagem sistêmica do processo de decisão [3], é o mais frequentemente adotado e assume que todo o processo de decisão do usuário é baseado no pleno conhecimento acerca dos objetivos e também que todos os caminhos alternativos para alcançá-los são conhecidos, sendo possível então determinar a relação custo-benefício de cada um deles e, a partir daí, tomar a decisão sobre o caminho a ser seguido. Este paradigma requer total quantificação dos fatores de influência e o problema de decisão é visto como a escolha de uma opção num conjunto de alternativas e cenários e suas estimativas probabilísticas de ocorrência. Assim, cada uma das alternativas é quantificada a partir de sua relação de custo-benefício, caracterizando a decisão.

Todavia, este paradigma tem uma série de problemas em sua implementação. O primeiro ponto mencionado por Ortúzar e Willumsen [3] é que alguns fatores não são simples de se quantificar, como dinheiro 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 onde 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 [4] 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 [5]. Ele é caracterizado por uma maior abstração com relação aos objetivos, que apenas são “fracamente definidos, sem a tentativa de quantificá-los” [3]. 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.

2.3 Trabalhos correlatos

Uma revisão sistemática prévia foi realizada antes do desenvolvimento do trabalho apresentado neste artigo [6]. Foram identificados 21 trabalhos que apresentam métodos de simulação envolvendo transporte multimodal [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] sendo que mais de 80% destes trabalhos são focados na simulação microscópica. Nestes trabalhos o objetivo da simulação reside na simulação de situações envolvendo veículo-pedestre em situações de conflito (cruzamentos ou vias compartilhadas), de forma a identificar a influência de um sobre o outro. Não foram observados trabalhos com a implementação de modelos voltados para a simulação da rede de transporte de uma cidade completa combinando múltiplos meios e aspectos do modelo microscópico [6]. Adicionalmente, uma análise profunda e detalhada sobre sistemas inteligentes para o sistema de transporte pode ser encontrada no trabalho de Bazzan e Klügl (2013).

Dentre outros simuladores disponíveis com objetivos relacionados ao proposto neste trabalho, podemos citar o SUMO¹ e o MATSim² [29]. O SUMO é um simulador de código aberto para a simulação microscópica de tráfego rodoviário, permitindo a construção de malhas envolvendo transporte individual e público que façam uso deste ambiente. O MATSim, por sua vez, permite a simulação de grandes redes de transporte envolvendo múltiplos meios a partir de uma abordagem utilizando agentes. A implementação da simulação é responsabilidade do simulador e utiliza um modelo de simulação microscópica baseada em filas, no qual a dinâmica do tráfego é modelada como filas de espera [30]. O simulador é extensível, permitindo ao seu utilizador além de parametrizá-lo também desenvolver novos módulos.

O simulador MATSim se aproxima ao que é proposto neste trabalho, a principal diferença é que no presente trabalho as conexões podem ser utilizadas como interface para diferentes modelos de simulação, por exemplo, um usuário representado de maneira microscópica pode ser tratado de maneira mesoscópica ou macroscópica ao entrar em um trem.

Para isso, é necessário que a conexão seja implementada de forma a consumir elementos do modelo microscópico (por exemplo, usuários) e produzir elementos do respectivo modelo mesoscópico ou macroscópico (por exemplo, conjuntos de usuários). Adicionalmente, a implementação dos modelos mesoscópico ou macroscópico deve seguir o conceito de ciclos descrito na seção 3.2 deste artigo.

3. Desenvolvimento

3.1 Apresentação do Cenário

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 [31].

O Metrô está interligado com o sistema de ônibus urbano, por meio de terminais, os quais propiciam a distribuição do fluxo para outras regiões que 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 a atender aos municípios desta área, complementando a oferta de transporte oferecida pela CPTM.

3.2 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 utilizados os elementos estruturais básicos propostos por [2] assim como as modelagens microscópica e mesoscópica, apresentadas no trabalho de [1], assuntos discutidos na fundamentação teórica deste trabalho. O modelo possui três categorias de objetos: Estruturais, Populacionais e Operacionais. Objetos Estruturais representam as estruturas físicas do sistema, ou mesmo representações lógicas de estruturas físicas, por exemplo, uma região. Objetos Populacionais são aqueles que representam o usuário e seus distintos comportamentos. Por fim, objetos Operacionais são aqueles referentes ao funcionamento do sistema, representando veículos e suas regras de operação.

Tomando como exemplo o transporte sobre trilhos, temos como objetos Estruturais as estações, conexões entre linhas, filas de embarque e de conexão; como objetos Populacionais, os usuários e elementos de seu processo de tomada de decisão e, como objetos Operacionais, os trens que operam nas linhas,

¹http://www.dlr.de/ts/en/desktopdefault.aspx/tabid-9883/16931_read-41000/

²<https://www.matsim.org/>

assim como suas configurações de operação (distância mínima entre veículos, tempo de parada, capacidade de passageiros, etc).

O sistema abarca todas estas categorias, 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 [2], enquanto os objetos populacionais e operacionais lidam diretamente com os aspectos de simulação apontados por [1].

Observando a estrutura apresentada por [2], 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 das arestas, definimos o conceito de Ciclo. O Ciclo, é um valor numérico inteiro, indicando o número de iterações a qual a simulação transcorrerá. Um Ciclo pode ser entendido como a menor unidade de tempo dentro da simulação. Cada aresta do grafo utiliza o peso em termo de ciclos, de forma a indicar quantas iterações um determinado modal levará para transpor aquele trecho do caminho. Por exemplo, entre duas estações de metrô **A** e **B**, podemos definir que um trem levará 5 ciclos para percorrer o trecho **A** → **B**. Em determinado momento, o número de ciclos pode aumentar, representando a existência de algum problema como a redução da velocidade, ou pode diminuir, representando, por exemplo, o aumento da velocidade do veículo. Outro aspecto a respeito da existência do ciclo é a existência de uma unidade normalizada entre diferentes modais (sem as discrepâncias que seriam observadas, por exemplo, se adotássemos distância e velocidade).

Dado que cada ciclo representa uma iteração da simulação, há uma série de ações que ocorrem a cada uma destas iterações: A movimentação de veículos e passageiros dentro dos diferentes sistemas, a entrada e saída de passageiros em um trem estacionado em uma estação, o início ou término de um problema, modificando a fluidez de um modal (e, conseqüentemente o recálculo do número de ciclos de todas as arestas impactadas por tais mudanças), a modificação (ou não) de trajeto, de acordo com o perfil de cada usuário, etc. Cabe ressaltar que a estrutura adotada permite ao desenvolvedor tratá-las de forma paralela, uma vez que as ações dentro de um sistema são isoladas.

Desta forma, o ciclo 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 1 contém a representação em grafo de parte do Metrô de São Paulo. Observa-se 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 túnel 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 na mesma escala, 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.

A representação em grafos é importante também para uniformizar os sistemas envolvidos, permitindo que sejam feitas manipulações referentes à 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 permite que a implementação de cada um dos sistemas seja feita de maneira independente, seja utilizando de autômatos celulares para transporte sobre trilhos, seja utilizando 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.

3.3 O framework

O framework foi desenvolvido de maneira incremental, em paralelo com o desenvolvimento da simulação (que será discutida posteriormente), considerando o Metrô de São Paulo como cenário-modelo. Foram utilizados princípios de Orientação a Objetos (OO) para garantir um sistema modular e extensível. Os códigos foram desenvolvidos utilizando a linguagem de programação Java, 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: (a) Prover uma estrutura única para a implementação de diversos sistemas de transporte; (b) Gerenciar a inserção e direcionamento de usuários na simulação; e (c) 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 2, o qual apresenta as classes e interfaces do framework. A seguir, discutiremos sobre as classes, interfaces e métodos disponíveis, apresentando seus papéis e objetivos na construção de uma simulação.

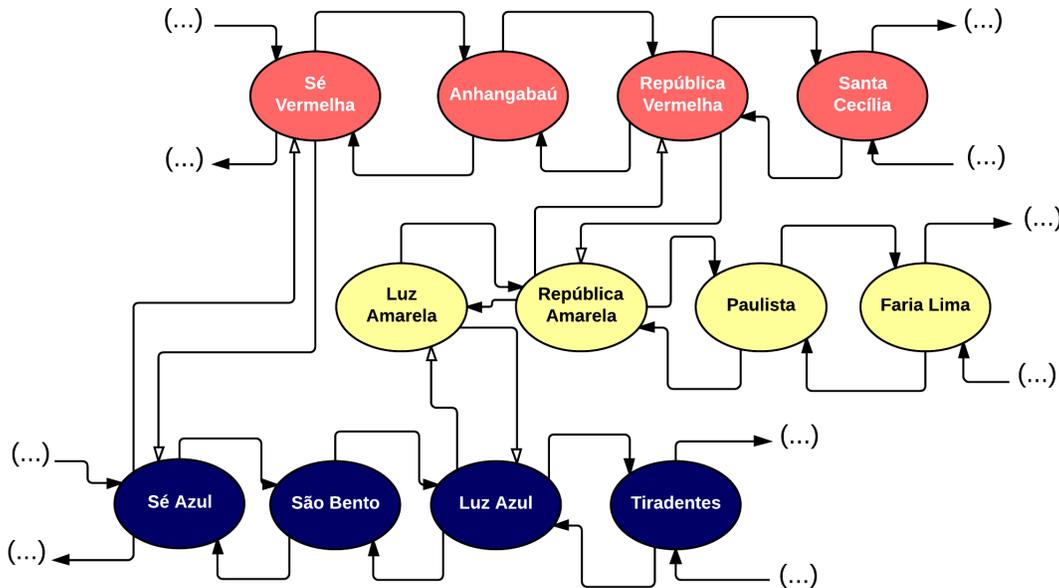


Figura 1. Grafo representando parte do Metrô de São Paulo - Estações são vértices, trechos entre estações são arestas (arestas com setas pretas representam ligações entre estações em uma mesma linha enquanto brancas entre linhas diferentes)

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 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 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*. Nesta classe são definidas as configurações de parâmetros da simulação e também a estrutura que deverá ser simulada, a partir do registro de instâncias das classes *System* e *OuterTransition*.

Para a representação de um sistema, por exemplo, uma das linhas de metrô, tem-se a classe abstrata *System*. Ela implementa *Operational* e seus métodos, com a configuração e comportamento definido de acordo com o tipo de sistema em questão.

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*. Com métodos que representam 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. A interface *ITransition* é utilizada por todas as classes que representam uma transição. Implementando esta interface, temos a classe abstrata *InnerTransition*, que representa uma transição restrita ao sistema e a classe abstrata *OuterTransition*, que representa uma transição envolvendo estruturas de dois sistemas distintos. Uma

InnerTransition é usada para representar a ligação entre duas estruturas de um sistema, como por exemplo o trajeto a ser percorrido por um trem entre duas estações, enquanto uma *OuterTransition* representa a ligação entre sistemas, como por exemplo, a conexão entre duas linhas do Metrô distintas.

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. Esta implementação concreta foi criada para, no contexto deste trabalho, representar a ligação entre duas linhas distintas.

Para a representação de veículos, temos a classe abstrata *Vehicle*, que possui métodos para gerenciar o embarque e desembarque de passageiros e a movimentação do veículo dentro do sistema, com seu respectivo gerenciamento de estado.

A classe *User* é utilizada para a representação do usuário. Cada usuário possui um *PathQueue* associado com a representação do caminho a ser seguido na simulação. Trata-se de 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: (a) *DONOTHING*: O usuário não deve realizar nenhuma ação ao chegar na respectiva estrutura; (b) *DISEMBARK*: O usuário deve desembarcar do veículo no qual se encontra ao chegar na estrutura; (c) *EMBARK*: O usuário deve entrar na fila de embarque para algum veículo quando chegar na estrutura; (d) *WAIT*: O usuário deve aguardar alguma mensagem antes de seguir para o próximo passo; (e) *ENTER*: O usuário deve entrar na estrutura em questão; e (f) *FROMTRANSFER*: O usuário chegou em uma transição do

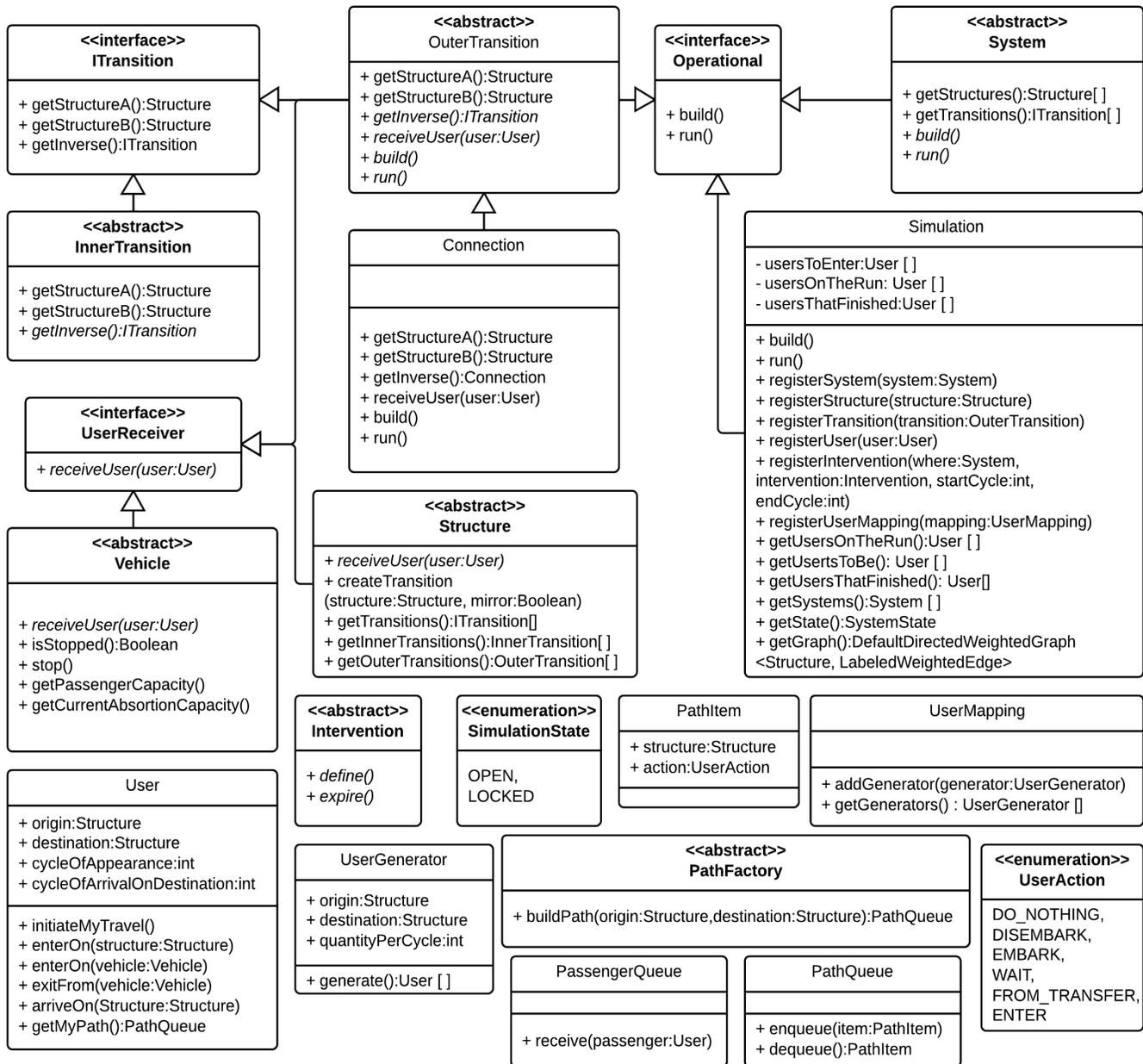


Figura 2. Diagrama de classes do modelo

tipo *OuterTransition* e deve entrar na estrutura. Em essência, tem o mesmo efeito de *ENTER*, servindo apenas para denotar a origem da ação;

Por fim, a classe *PassengerQueue* corresponde a uma fila de passageiros ou usuários dentro de uma estrutura. O objetivo desta classe é representar estruturas como a plataformas de estações, onde usuários aguardam a chegada do trem.

Sobre a geração de usuários, existem as classes *UserMapping* e *UserGenerator*. *UserMapping* é uma coleção de instâncias do tipo *UserGenerator* cada qual indicando a relação entre estruturas de origem e destino e a quantidade de usuários gerados por ciclo.

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*. Uma intervenção pode atingir qualquer componente da simulação, cabendo ao desenvolvedor a implementação dos respectivos métodos de definição e expiração da intervenção desejada.

3.4 Funcionamento e utilização do framework

A utilização do framework parte da configuração do ambiente e a definição dos sistemas a serem simulados. Isto é feito a partir da criação de instâncias relativas as estruturas e instâncias relativas as transições internas de cada sistema (no caso de uma linha do metrô de São Paulo, as estações e os túneis entre uma estação e outra, respectivamente). Em seguida,

deve ser feito o vínculo entre as estruturas e suas respectivas transições internas (uma estação e os túneis referentes a cada um dos sentidos da linha). Neste ponto, o resultado é um grafo representando cada um dos sistemas (linhas), de forma isolada.

Os próximos passos são: a criação das transições entre sistemas e o registro de cada uma destas linhas na simulação. A criação de uma transição é feita a partir do vínculo de uma instância de uma transição do tipo *OuterTransition* com as duas estruturas de sistemas distintos, as quais servirão para permitir a locomoção do usuário entre sistemas (no caso do metrô, seria a ligação entre as estações Sé - Linha Vermelha e Sé - Linha Azul). O registro, por sua vez, é feito a partir da invocação do método *registerSystem(system: System)*, para cada um dos sistemas a ser simulado.

Uma vez realizados os registros dos sistemas, deverão ser feitas as criações das intervenções desejadas (com seus ciclos de início e término), e, por fim, os geradores de usuários. Um gerador de usuário é definido por uma estrutura de origem, uma estrutura de destino e o número de usuários com esta configuração que deverá ser gerado por ciclo. Em seguida, este gerador deve ser adicionado ao dicionário indexado pela estrutura de origem. Ainda, cada um destes mapeamentos deve possuir um ciclo de início e um ciclo de término, permitindo assim que o desenvolvedor especifique a variação da geração de usuários no decorrer da simulação, de forma similar às intervenções. É importante ressaltar que cada um dos usuários gerados irá determinar o seu caminho com base no grafo representando os sistemas simulados e o número de ciclos que irá levar para atingir o seu destino. Cada usuário pode recalculer o caminho a ser percorrido a cada ciclo, de acordo com o seu perfil.

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 herdaram de *Operational*, exceto *Simulation*. Além da criação das estruturas, são gerados os usuários que irão percorrer a simulação, com a criação de suas respectivas rotas e ciclos de entrada na simulação. Nesta etapa também é definido o perfil do usuário, de acordo com a proporção de cada tipo definida na configuração da simulação. 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; e (4) Execução do ciclo para cada um dos sistemas utilizados e gravação dos respectivos *logs* das estruturas e veículos registrados na simulação; conforme pode ser observado no algoritmo 1.

3.5 O Usuário

O funcionamento do usuário parte do mecanismo de agentes inteligentes [32], no qual 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

```

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 faça
4     para cada
       userGenerator ∈ userMapping.getGenerators() faça
5       | Simulation.registerUsers(userGenerator.generate())
6   para cada user ∈
     Simulation.getUsersToBe() em que para cada user :
     User, user.cycleOfAppearance == currentCycle faça
7     | user.initiateMyTravel() usersOnTheRun.add(user)
       | usersToBe.remove(user)
8   para cada
     intervention ∈ S.getInterventionsToBegin(currentCycle)
     faça
9     | intervention.define()
10  para cada
     intervention ∈ S.getInterventionsToEnd(currentCycle) faça
11    | intervention.expire()
12  para cada user ∈ S.getUsersOnTheRun() faça
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() faça
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() faça
22    | Grava o log para a estrutura structure.writeLog()
23  para cada vehicle ∈ S.getActiveVehicles() faça
24    | Grava o log para os veículos em deslocamento
        | vehicle.writeLog()

```

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

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 uma mensagem para todos os usuários embarcados, onde, cada qual executará uma determinada ação de acordo com sua rota planejada - que pode ser desembarcar ou continuar no veículo, recalculer 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: (a) Entrar ou sair de um veículo; (b) Entrar ou sair de uma estrutura; (c) Entrar ou sair de uma conexão; ou (d) 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 com-

portamentos 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, Agressivo, Moderado e Conservador, os quais indicam a frequência na qual o usuário altera a sua rota. Um usuário com comportamento Agressivo certamente recalculará sua rota a cada mudança no tempo estimado de chegada, se o número de ciclos estimado para a chegada ao seu destino for maior do que o esperado. Este tipo de usuário sempre conhece o melhor caminho disponível no momento. Um usuário Conservador, por sua vez, escolherá sua rota apenas uma vez e então permanecerá nela, salvo se houver alguma interrupção nesta rota (onde, então ele tentará buscar uma nova rota). Já o usuário Moderado poderá ou não recalculá-la a sua rota se o número de ciclos estimado para a chegada ao seu destino for maior do que o esperado inicialmente. Este cálculo é feito com base em uma probabilidade definida na configuração da simulação.

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 *User-Behavior*, 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 as 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 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.

4. Avaliação do Modelo

A avaliação do modelo foi feita com base na utilização dos dados disponibilizados através da pesquisa Origem-Destino do Metropolitano de São Paulo [33], considerando o “horário de pico”. Os detalhes sobre como os dados foram tratados podem ser consultados em [34]. 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 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 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.

Há ainda o quinto cenário, no qual 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. Devem 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).

Adicionalmente, foi adicionado uma especialização sobre o cenário 6, com o intuito de observar o comportamento da simulação com alterações no fluxo de entrada de usuários, o que representaria, por exemplo, a situação da linha após o horário de pico.

4.1 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, o número de usuários gerados neste intervalo inicial será desconsiderado.

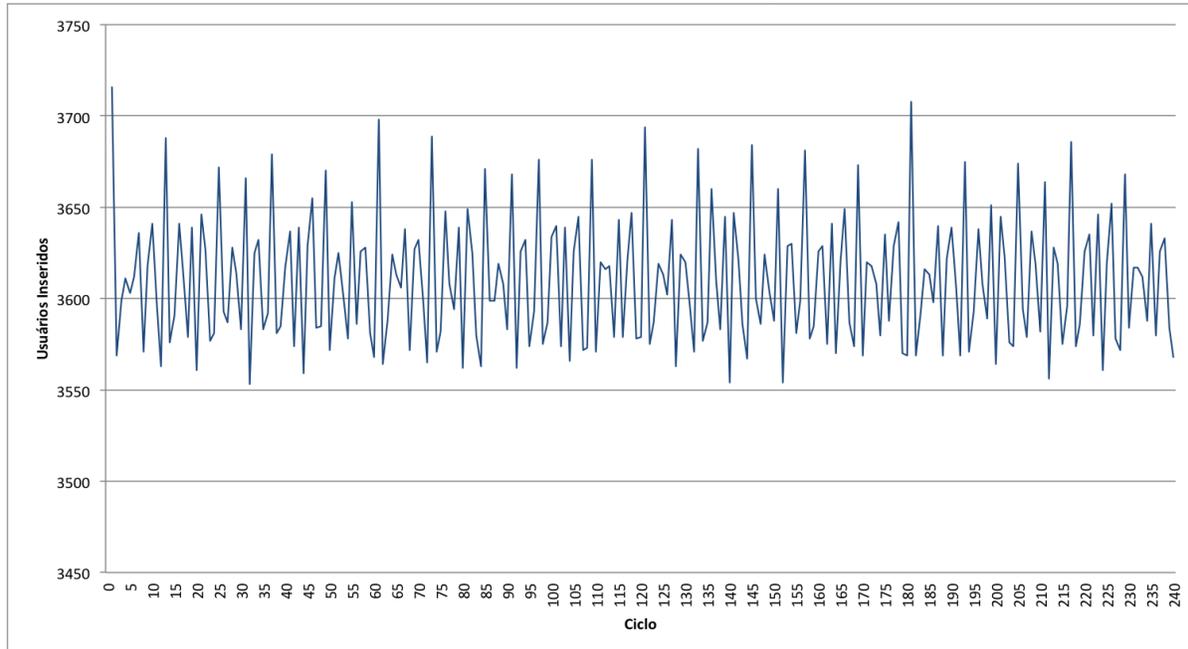
A figura 3 apresenta o número de usuários inseridos na simulação por ciclo. Como é possível observar, o valor varia entre 3.716 usuários/ciclo (máximo) e 3.553 usuários/ciclo (mínimo), com a média de 3.610 usuários por ciclo. A variação de valores é esperada e atribuída aos usuários que entram na simulação em ciclos alternados, sendo que o valor se mantém 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 1), 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.

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 (dentro do período simulado).

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. A figura 4a 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 Itaquera é de aproximadamente 440 passagerei-

Figura 3. Cenário 1: Usuários Inseridos por Ciclo**Tabela 1.** 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% |

ros 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.

A figura 4b apresenta o número de passageiros em conexões a cada ciclo. Nesta figura 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.

Já nas estações Vila Prudente, Jabaquara e Tucuruvi a capacidade dos trens é suficiente para a demanda apresentada. Inclusive as linhas que representam as estações Tucuruvi e Jabaquara se sobrepõem, com a mesma média de tempo de espera, pois estas linhas representam a média do intervalo entre os trens. O mesmo ocorre com a estação Vila Prudente.

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

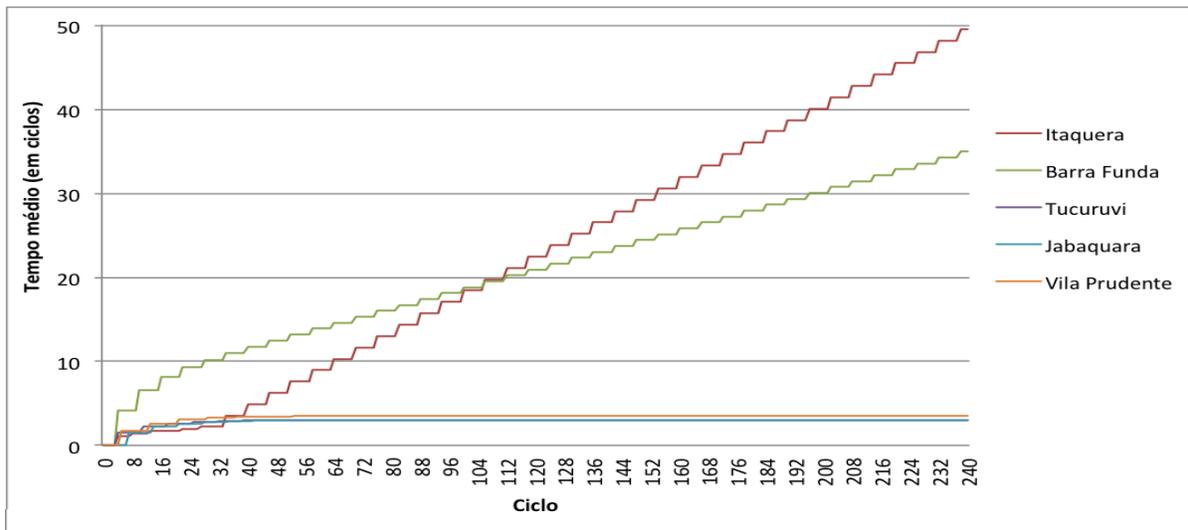
saiam da conexão, há a entrada de novos passageiros. Este comportamento ocorre porque o intervalo entre os trens (e desembarques) não é suficiente para prover um fluxo constante de passageiros

A segunda situação é a observada na conexão República Vermelha - Amarela, a qual apresenta um volume constante de passageiros. De forma similar à 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).

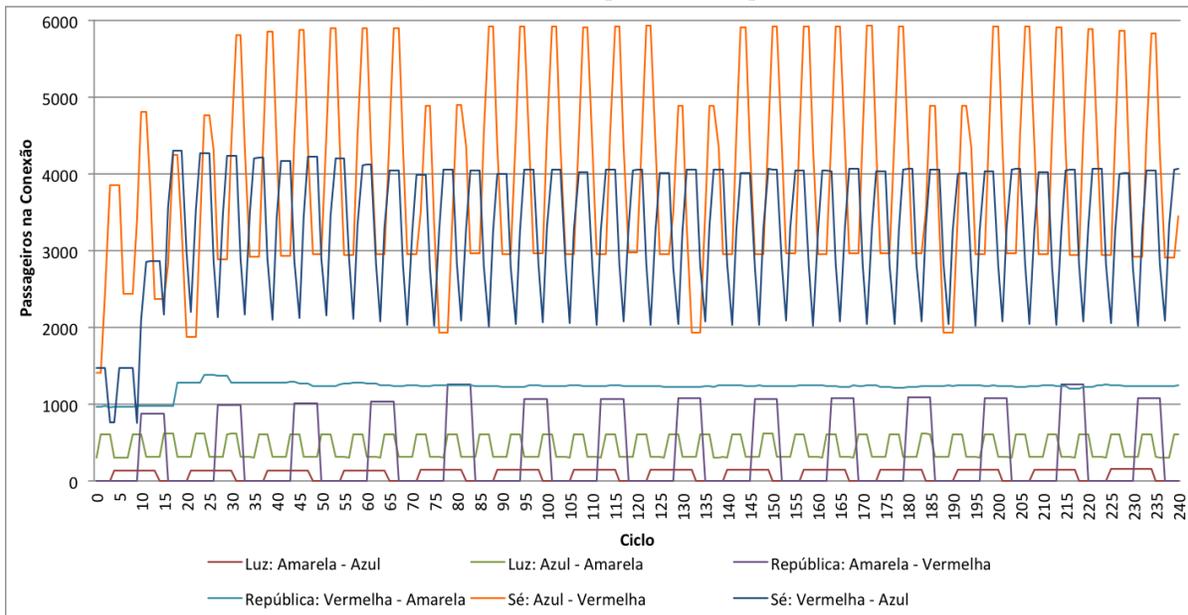
Na terceira situação, temos o mesmo mecanismo de picos e vales, estes com valor zero. Neste caso, antes que um novo trem chegue, os passageiros que entraram anteriormente já cruzaram a conexão, ou seja, há momentos em que a conexão fica vazia.

4.2 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) Evolução do tempo médio de espera



(b) Passageiros em conexões por ciclo

Figura 4. Cenário 1: Evolução do tempo de espera e dos passageiros nas conexões

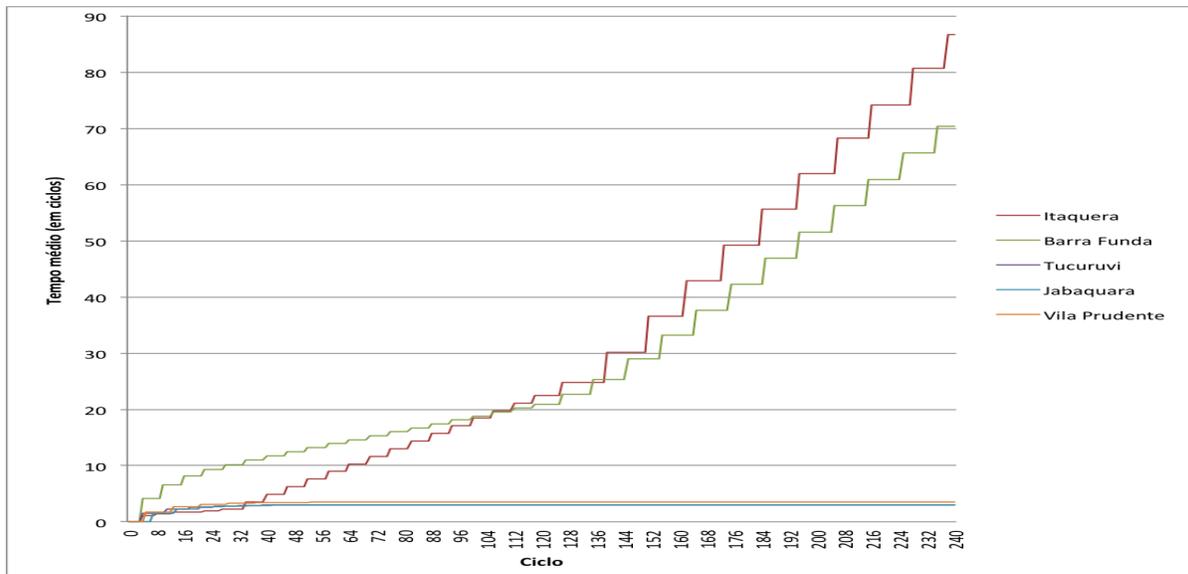
A velocidade será reduzida pela metade em uma linha completa. O efeito observado será o aumento do tempo médio de espera nas estações, uma vez que o intervalo entre trens aumentará consideravelmente. O momento de ativação das intervenções será no ciclo 180, que representa a metade da simulação (60 ciclos 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 e os impactos que as alterações tiveram sobre elas. É esperado um aumento nas

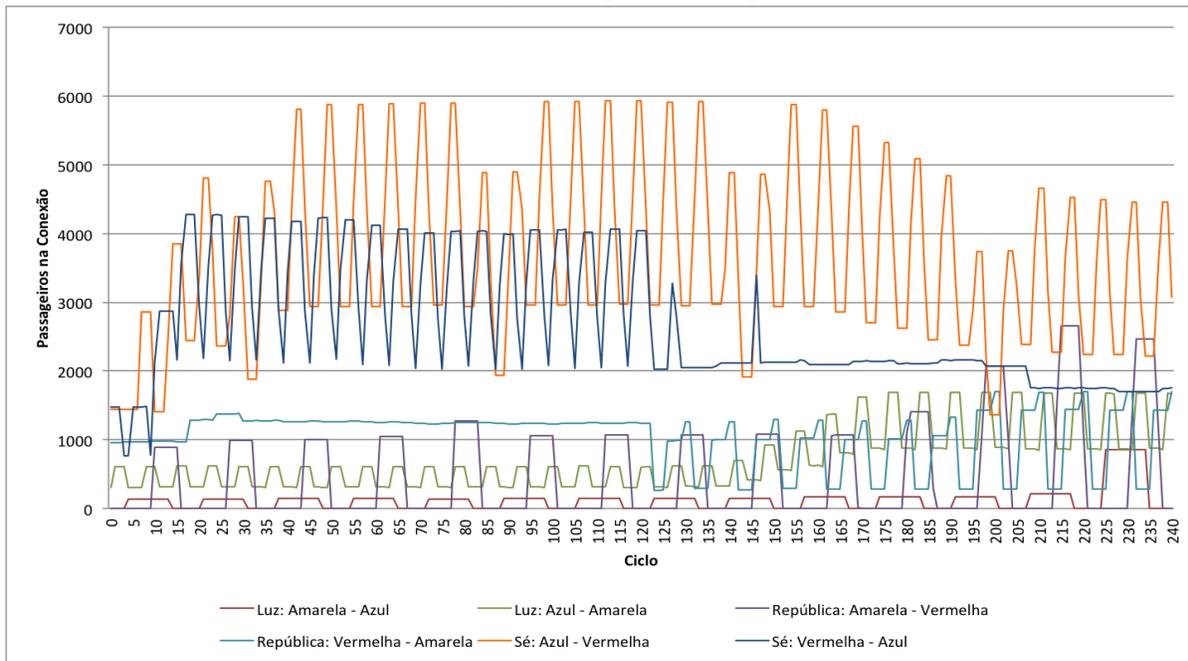
transferências que sejam rotas alternativas ao uso da linha vermelha.

A figura 5a 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 afeta-



(a) Evolução do tempo médio de espera



(b) Passageiros em conexões por ciclo

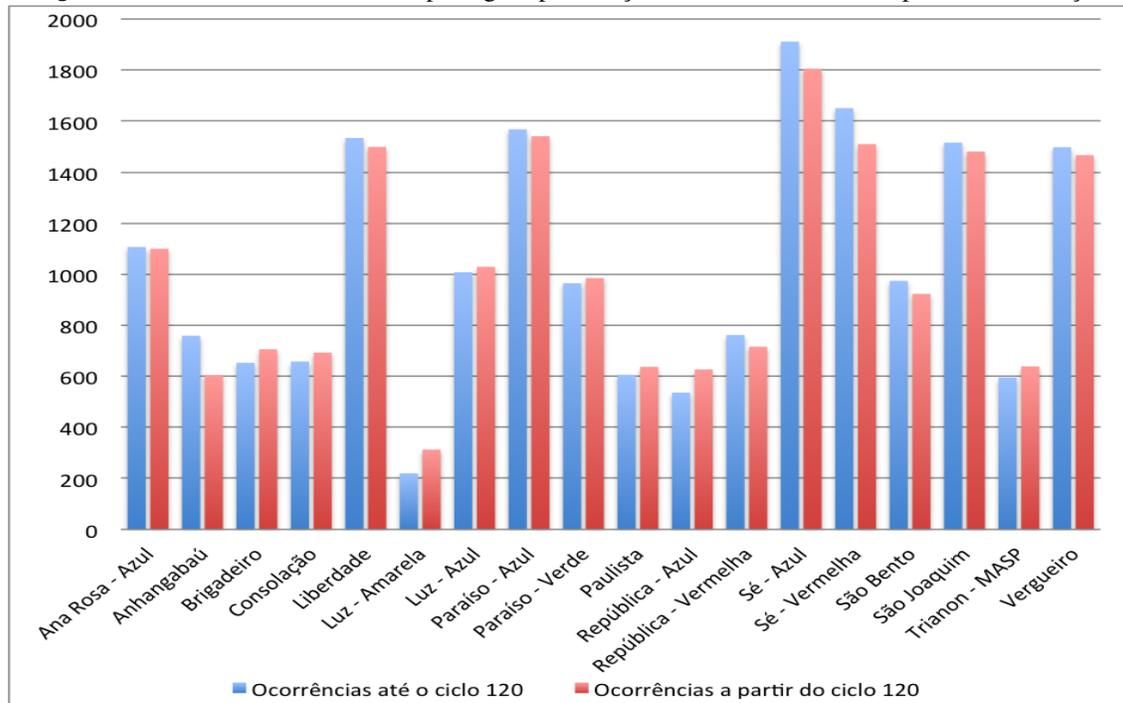
Figura 5. Cenário 2: Evolução do tempo de espera e dos passageiros nas conexões

das 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.

A figura 5b, temos os passageiros em conexão por ciclo. Mais uma vez é possível notar que, antes da intervenção (ou seja, do ciclo 0 ao 119), a figura é praticamente idêntica à sua 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.

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,

Figura 6. Cenário 2: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção

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 pela figura 6, o qual mostra o número de ocorrências de estações nas rotas antes e depois da ativação da intervenção. A figura 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.

4.3 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.

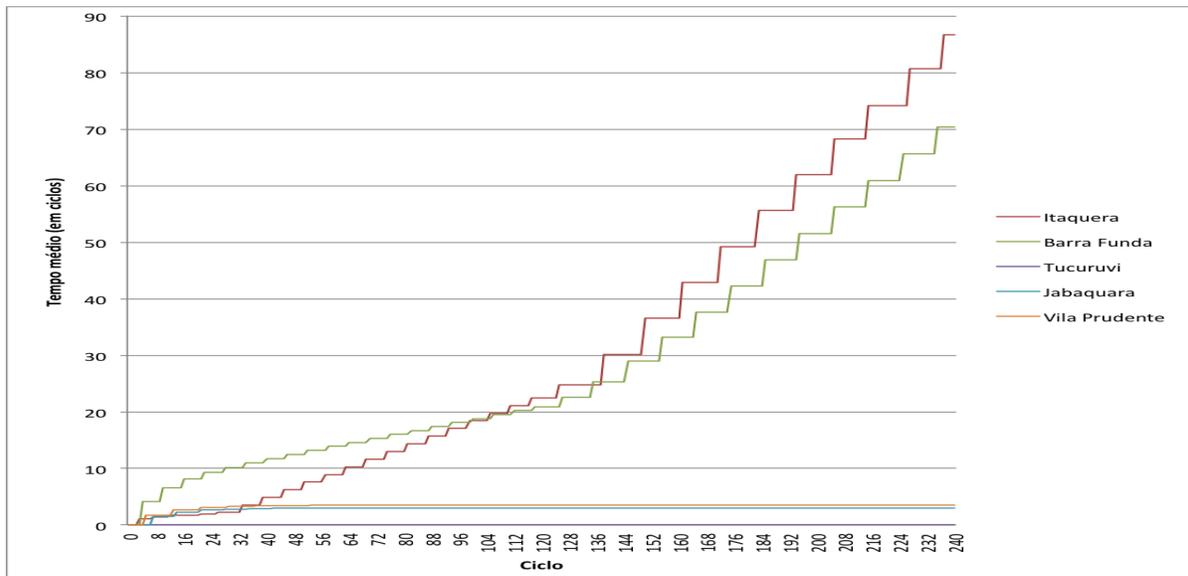
A modificação esperada, neste caso, é a antecipação da mudança de fluxo de usuários nas conexões. Isto porque, no cenário anterior, quando uma intervenção ocorre, as mudanças

de rotas são 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 são também atualizados, a modificação dos fluxos das conexões ocorre mais cedo, próximo do ciclo 120. Isto pode ser observado na figura 7b. Observe que as modificações aparecem alguns ciclos antes se comparada com a figura 5b, do cenário anterior.

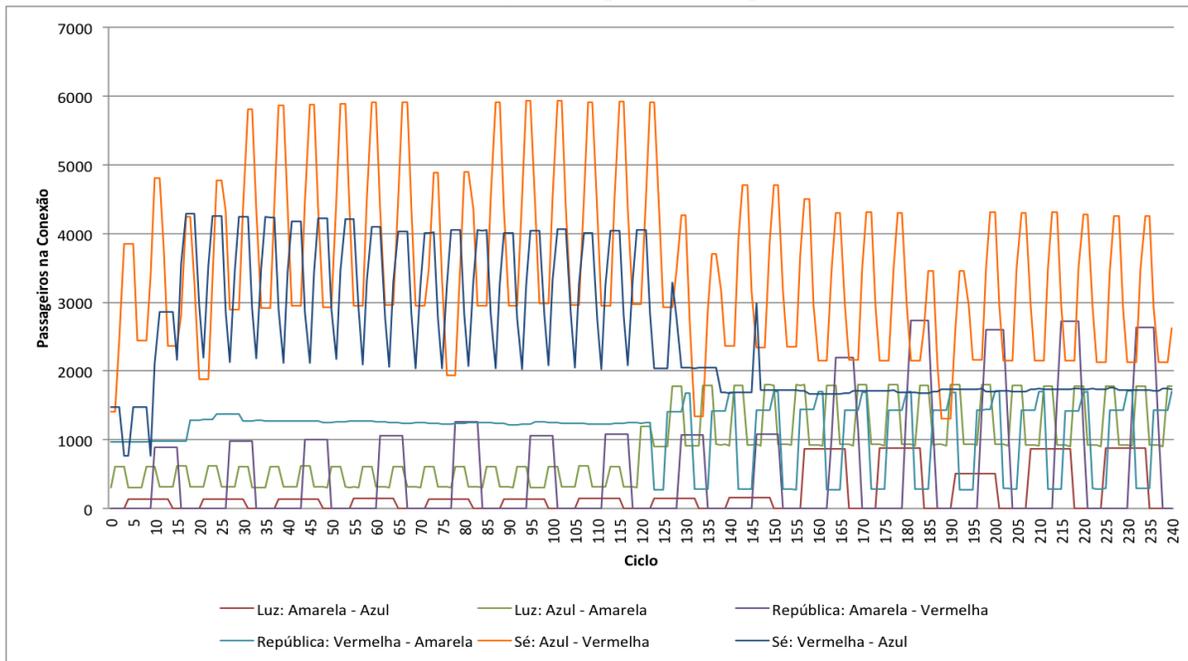
O restante do estado da simulação é similar ao cenário 2, tanto no estado antes da intervenção, quanto após. Ainda, é importante ressaltar que, uma vez que se trata da mesma intervenção, as rotas geradas são idênticas, tanto antes quanto após a intervenção. A figura 7a mostra a evolução do tempo médio 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.

Como a intervenção é ativada a partir da metade da simulação, metade dos usuários (436.775) não tem sua rota modificada. Todavia, após o início da intervenção, 17% dos usuários (147.452) não apresentam modificações em sua rota, isto porque já têm, no momento da ativação, a melhor rota possível para seu caminho. Os 33% restantes (282.172 usuários) 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.

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



(a) Evolução do tempo médio de espera



(b) Passageiros em conexões por ciclo

Figura 7. Cenário 3: Evolução do tempo de espera e dos passageiros nas conexões

usuário dentro do sistema, com tempo menor de reflexo para ações tomadas.

A seguir, serão apresentados o resultado da simulação com todas as características disponíveis: com usuários apresentando diversos comportamentos e mais intervenções.

4.4 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.

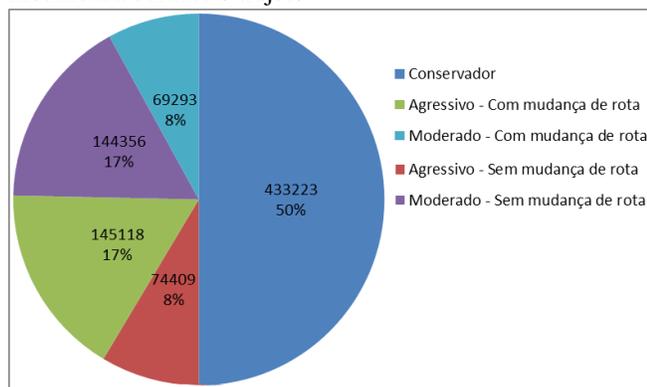
A configuração dos comportamentos de usuário foi distri-

buída da seguinte forma: (a) 50% apresentarão o comportamento *Conservador*, mantendo a rota definida na entrada da simulação, mesmo que o cenário mude completamente; (b) 25% apresentarão o comportamento *Agressivo*, onde escolherão uma nova rota sempre que houver alguma alteração na simulação; e (c) 25% apresentarão o comportamento *Moderado*, onde poderão escolher uma nova rota ou manter a rota original a partir de uma chance de alteração, definida como 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 a figura 8. Nela, 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*, este último apresenta maior volume de mudanças de rota em relação ao comportamento *Moderado*.

Figura 8. 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 a figura 9, na 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 na figura 10a. 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, 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 (figura 10b). 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.

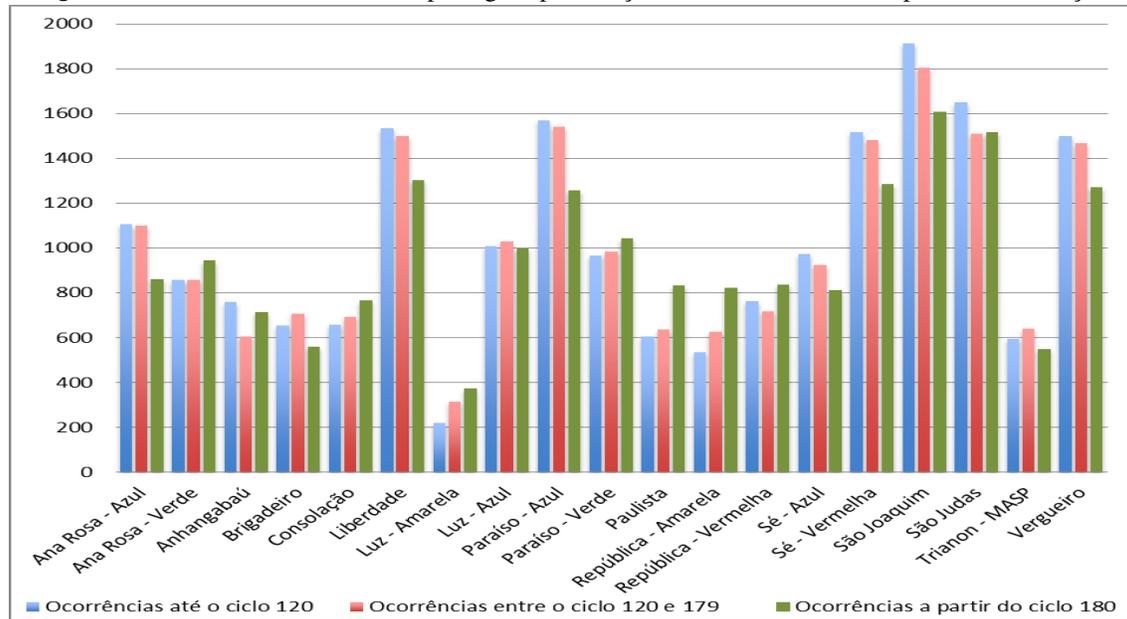
Desta forma, tem-se a visualização da evolução da linha de acordo com os comportamentos de usuário e intervenções ocorridas. Vale observar que o comportamento esperado foi de acordo com os cenários anteriores, indicando o adequado tratamento de múltiplas situações pelo modelo proposto.

4.5 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 (e não no momento em que o usuário entra na simulação). Desta forma, pretende-se verificar os 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 usuários. Sendo assim, a distribuição dos usuários neste cenário é feita

Figura 9. Cenário 4: Ocorrências de passagens por estações nas rotas - Antes e depois da intervenção

da seguinte forma: (a) 50% apresentarão o comportamento *Conservador*; 25% apresentarão o comportamento *Agressivo*; e 25% apresentarão o comportamento *Moderado*, com chance de alteração de rota definida em 50%. Esta distribuição é a mesma observada no cenário anterior.

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 à simulação anterior (figura 11). Pois, apesar das linhas não serem atrativas, uma parcela dos usuários ainda as mantém como escolha para seu trajeto.

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).

4.6 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.

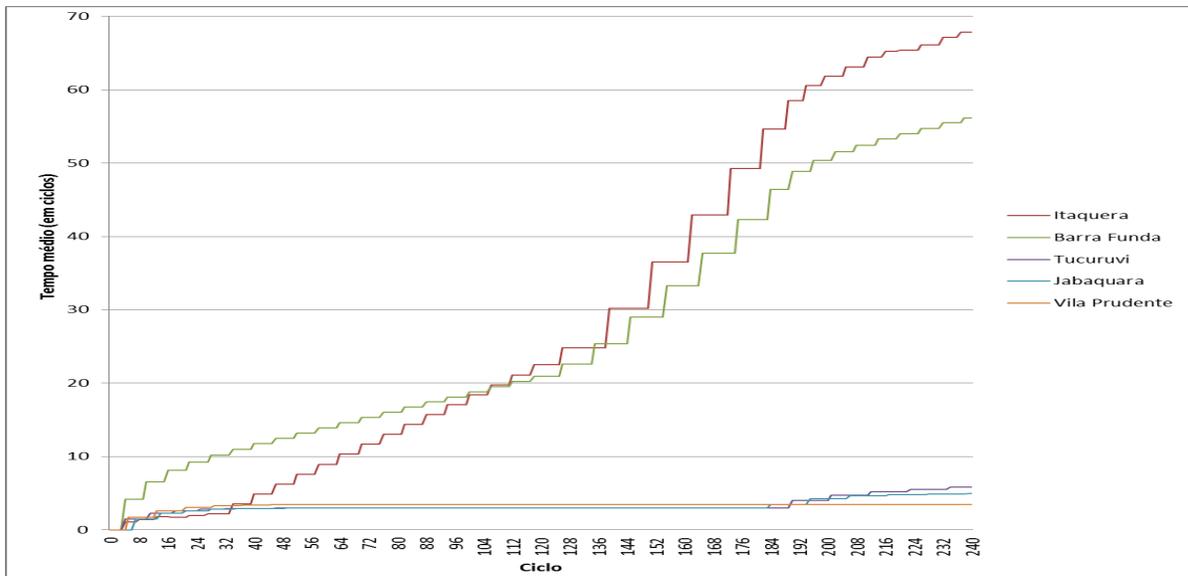
Para cumprir tal objetivo, será adicionada uma versão adaptada da prevista linha 6 - Laranja. Tal linha prevê a ligação entre as linhas Azul, Vermelha e Amarela. No caso da linha Azul, está prevista a ligação com a estação São Joaquim. Já com a linha Vermelha, a ligação não será direta, sendo feita pela 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.

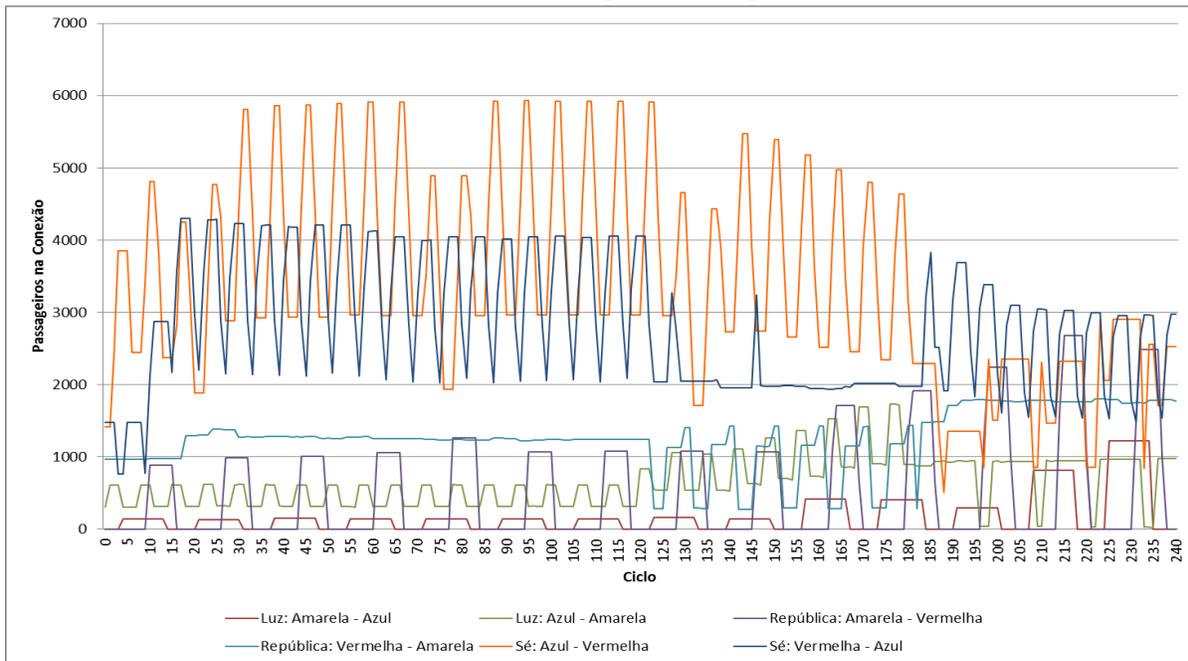
A ligação com a linha Vermelha, para efeitos desta simulação, será feita considerando uma conexão com a estação Barra Funda, com 20 ciclos para a transição. Já a ligação com a linha Amarela será feita adicionando a nova estação (todavia, não serão feitas alterações nas definições de caminhos). A estimativa das distâncias foi feita com base na distância em linha reta entre os pontos das estações. A tabela 2 apresenta as estações e distâncias das estações da linha 6 - Laranja. Já a tabela 3 mostra a configuração da linha Amarela, com o acréscimo da estação Higienópolis.

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 4 apresenta os valores utilizados para a configuração da linha. 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.

A figura 12 apresenta 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 a figura 13 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



(a) Evolução do tempo médio de espera



(b) Passageiros em conexões por ciclo

Figura 10. Cenário 4: Evolução do tempo de espera e dos passageiros nas conexões

intervenções na linha Vermelha, que acaba por torná-la mais interessante.

4.7 Cenário Especial: Alteração no fluxo de entrada usuários

Nesta seção será apresentado o comportamento do cenário além do intervalo de ciclos observado, ou seja, o que acontece depois do horário de pico observado, e também como a simulação se comporta com a mudança do fluxo de entrada de usuários.

Para tal, foi utilizado o cenário 6 como base estrutural,

e foram observadas duas situações distintas. Na primeira, a entrada de novos usuários é interrompida completamente no ciclo 240, ou seja, a simulação precisa lidar com os usuários inseridos até então. Na segunda situação ainda há entrada de usuários, porém o fluxo é reduzido para 25% do total de passageiros por ciclo adicionados. Ainda, para ambas as situações, temos a avaliação do cenário com intervenção (as mesmas observadas no cenário 6), e sem intervenção e a simulação é executada até o ciclo 340 (ou seja, 100 ciclos além do período inicial). As intervenções são interrompidas, em ambas as situações, no ciclo 240. A interrupção da entrada

Figura 11. Cenário 5: Passageiros em conexões por ciclo

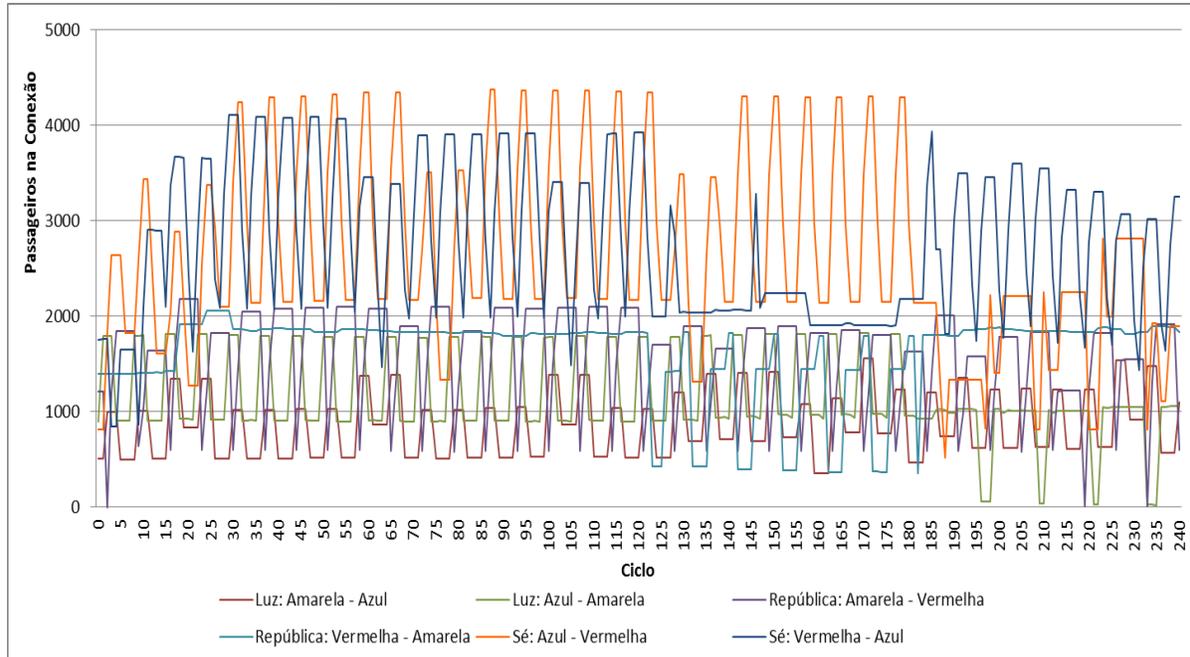


Tabela 2. Cenário 6: Configuração simplificada da linha 6 - Laranja

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

Tabela 3. Cenário 6: Configuração da linha 4 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 |

de usuários pode ser observada nas figuras 14a, onde não há intervenções ativas durante toda a simulação, e 14b, onde a simulação é feita considerando as intervenções.

Tabela 4. 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 |

Em ambas as figuras é possível observar que o tempo mé-

dio de espera nas estações continua a aumentar, nas estações onde há acúmulo de usuários, incluindo as alterações causadas pelas intervenções (quando as mesmas são acionadas). Isto ocorre porque, apesar de não haver usuários novos entrando na fila das estações, o tamanho da fila de embarque é muito grande, levando diversos ciclos para que as mesmas sejam esvaziadas e, conseqüentemente, o tempo de espera passar a ser zero. Com as estações onde não há acúmulo, todavia, o tempo médio de espera é reduzido a zero (ou seja, a fila é esvaziada) poucos ciclos após a interrupção da entrada de novos usuários.

Já as figuras 15a e 15b representam a mudança no fluxo de entrada de novos usuários (para 25% do fluxo original), sem que haja a interrupção. Em ambos os casos é possível observar que o perfil da curva referente ao tempo de espera é similar

Figura 12. Cenário 6: Passageiros em conexões por ciclo

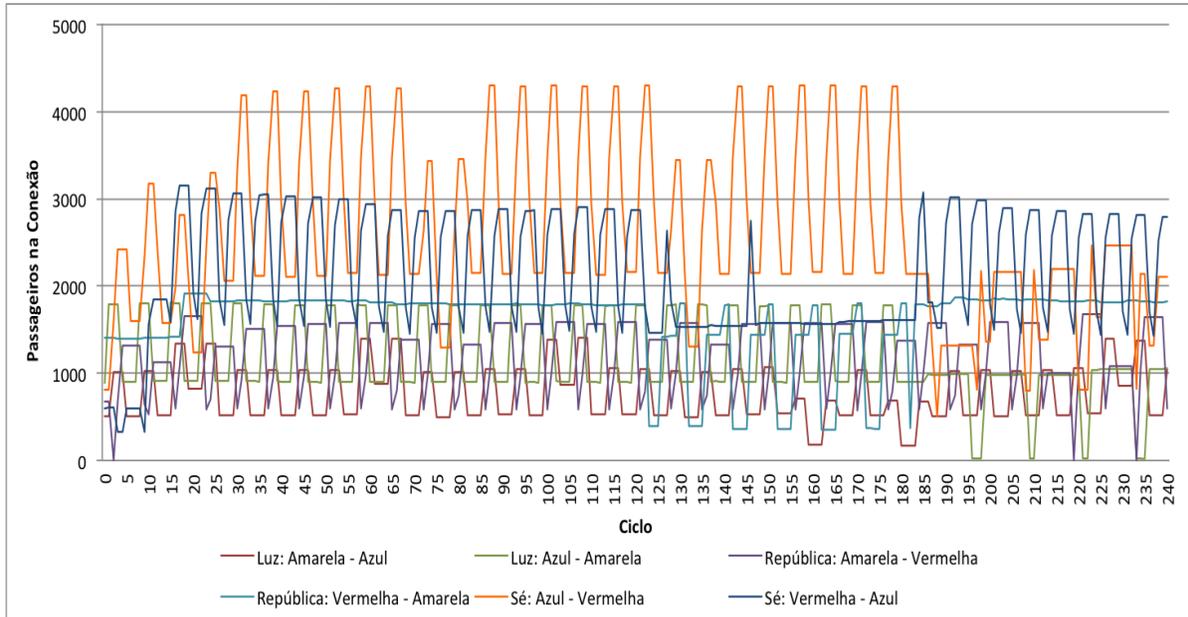
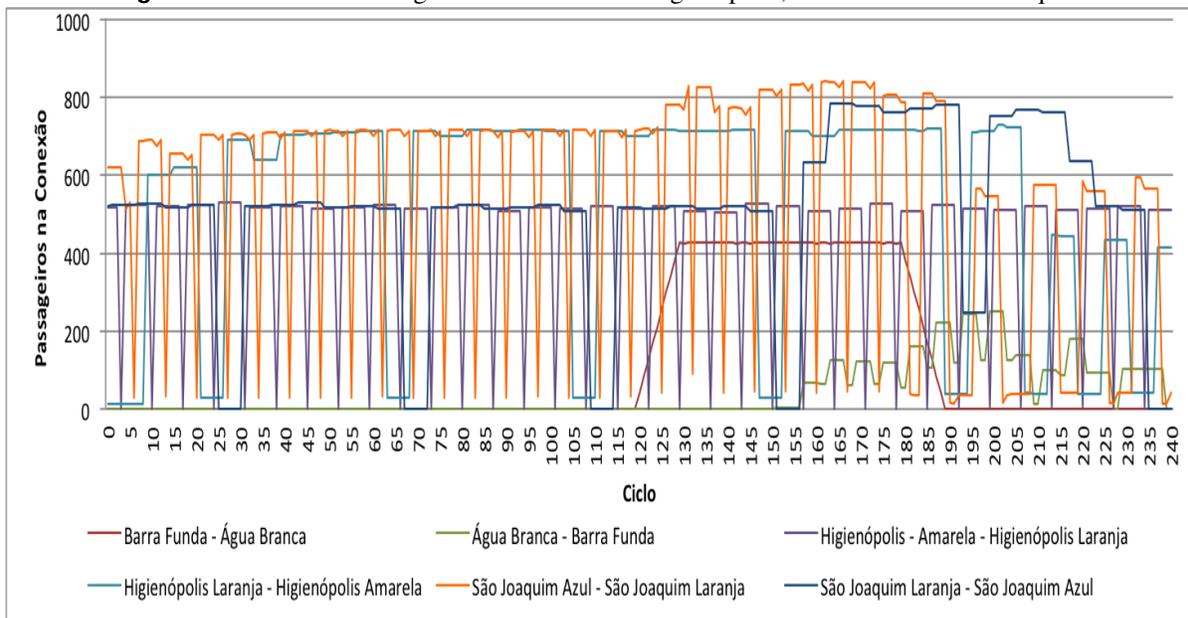


Figura 13. Cenário 6: Passageiros em conexões - Higienópolis, Barra Funda e São Joaquim



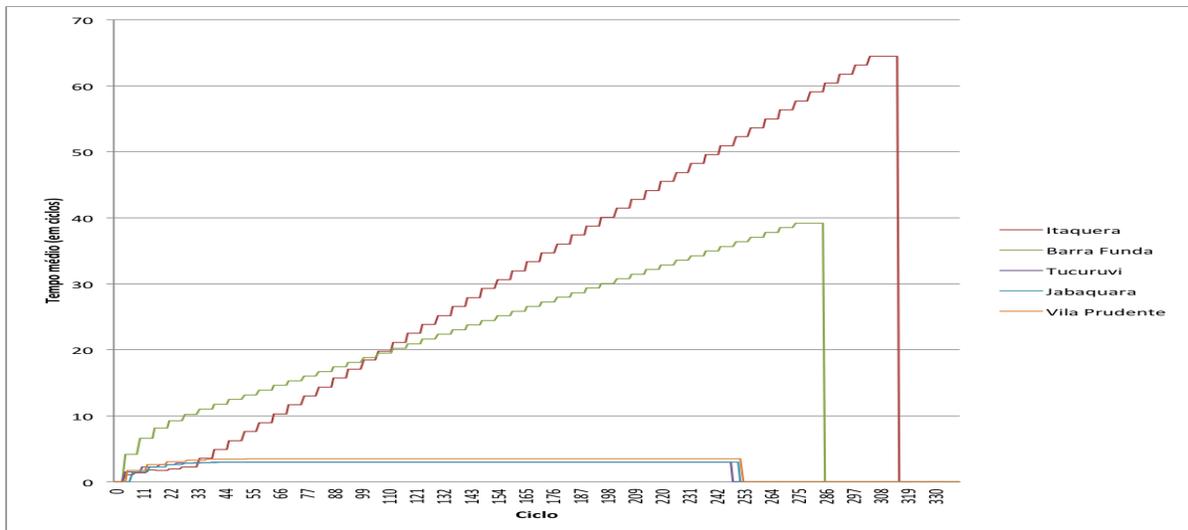
às observadas na situação anterior, com algumas exceções. A primeira é observada nas estações onde não há acúmulo de usuários. Nesta, o tempo de espera continua estável, uma vez que o tempo de espera é justamente o intervalo entre trens. Já para as estações onde há acúmulo, no ponto onde o tempo de espera caía para zero na situação anterior, o tempo de espera começa a cair, todavia, não até zero. Conforme é possível observar pela curva referente a estação Barra-Funda, há um ponto onde a mesma converge para o tempo de espera referente ao intervalo de espera entre trens, ou seja, o fluxo de usuários na estação é normalizado.

Conclui-se que a simulação apresentou o comportamento

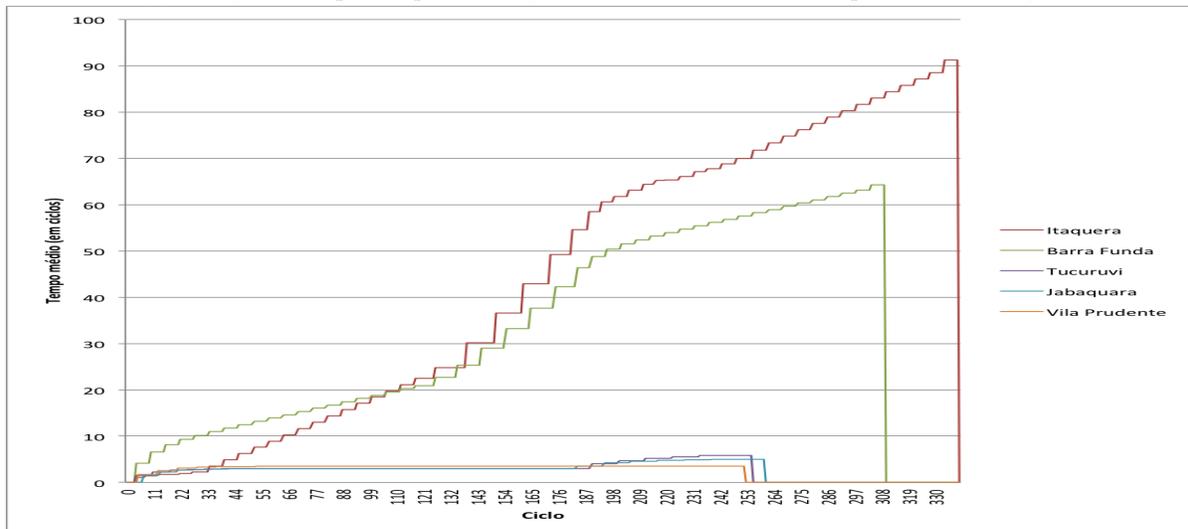
esperado, gerenciando adequadamente o fluxo de usuários em situações de acúmulo de usuários e também de redução do fluxo de entrada de usuários, desde a interrupção total até variações sutis.

4.8 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



(a) Evolução do tempo de espera na estação - entrada de usuários interrompida, sem intervenção



(b) Evolução do tempo de espera na estação - entrada de usuários interrompida, com intervenção

Figura 14. Cenário Especial: Evolução do tempo médio de espera - Entrada de usuários interrompida, com e sem intervenção

pertinente para sua análise.

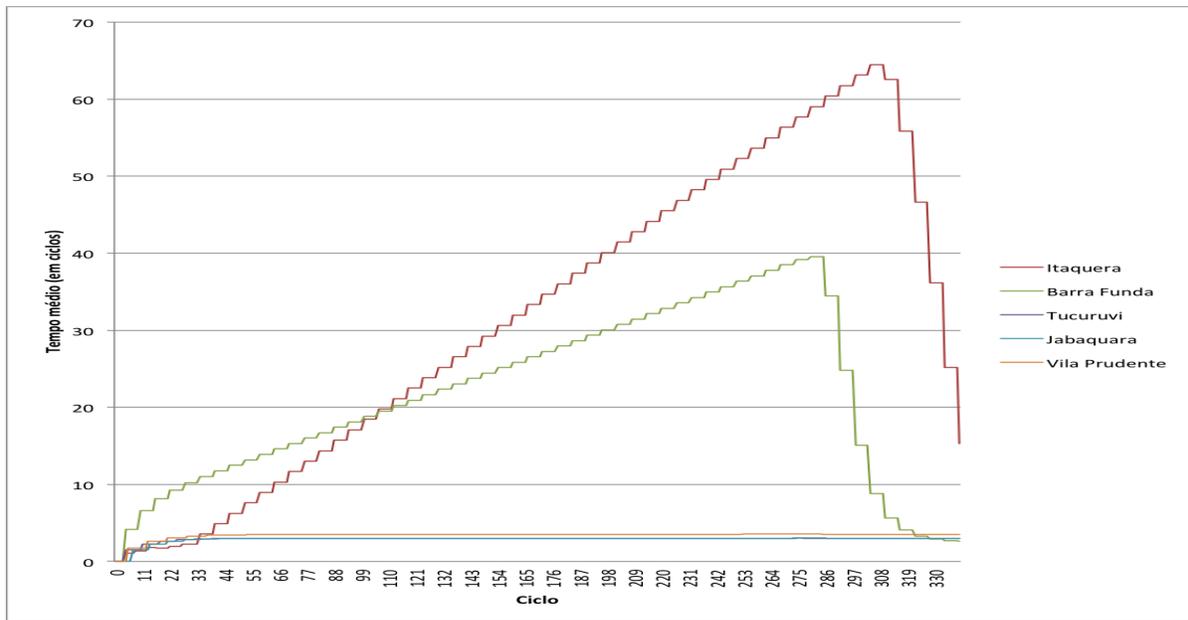
A figura 16 sumariza o tempo médio de deslocamento para os seis cenários. É notável o aumento entre os tempos observados entre o cenário 1 e cenário 2, uma vez que neste cenário é ativada a intervenção na linha Vermelha. É interessante observar os efeitos causados pelo grau de conhecimento do usuário 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

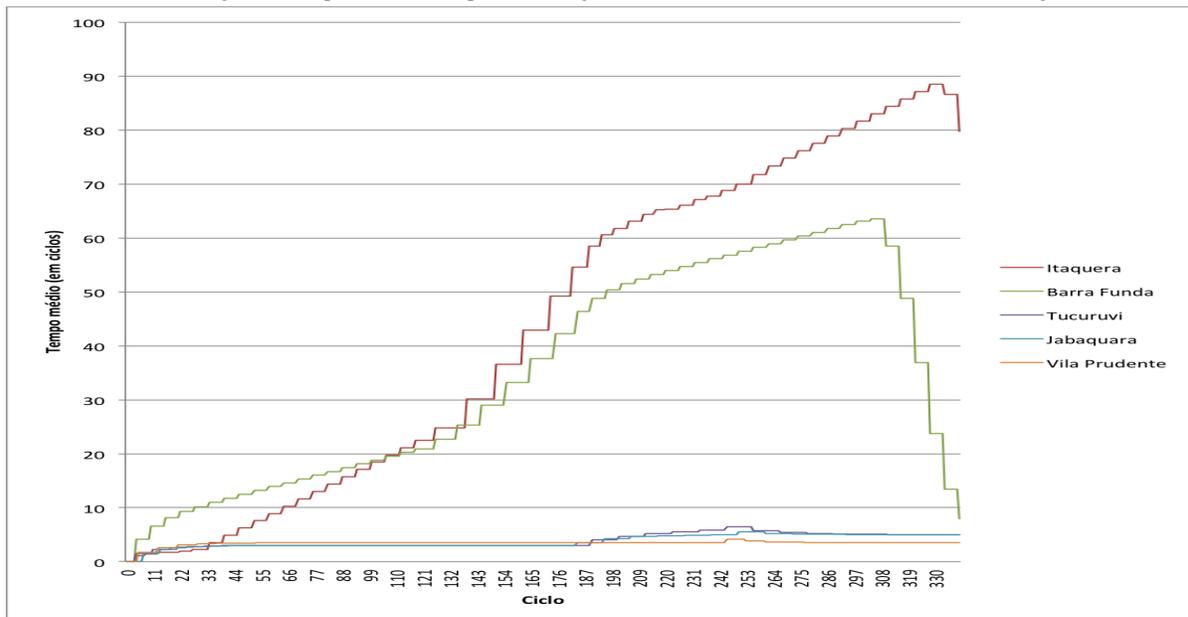
caminho ou utiliza o melhor caminho disponível na entrada e “Agressivo”, que sempre escolhe o caminho mais rápido para o momento).

Com base nos resultados dos cenários 3, 4 e 5 é possível vislumbrar a importância de o 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 criação de uma linha adicional, que permite concluir que, mesmo com uma linha com poucas saídas como a desenhada, há uma redução significativa no tempo médio de



(a) Evolução do tempo médio de espera na estação - entrada de usuários reduzida, sem intervenção



(b) Evolução do tempo médio de espera na estação - entrada de usuários reduzida, com intervenção

Figura 15. Cenário Especial: Evolução do tempo de espera - Entrada de usuários interrompida, com e sem intervenção

deslocamento, levando a concluir que um maior número de alternativas permite maior adaptação do sistema a situações adversas.

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).

5. Conclusão

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 [6], conforme exposto na revisão aqui feita.

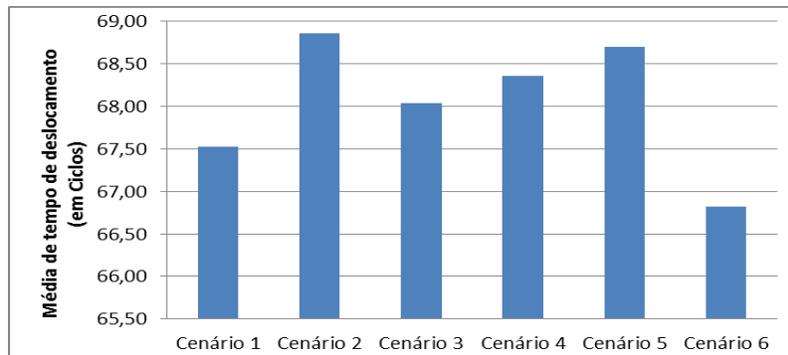


Figura 16. Tempo médio de deslocamento no período e cenários estudados

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 modais 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 todos os códigos fontes desenvolvidos estão disponíveis.

References

- [1] BARCELO, J. *Fundamentals of Traffic Simulation*. 1. ed. New York, USA: Springer, 2010. v. 145. (International Series in Operations Research & Management Science, v. 145).
- [2] RODRIGUE, J.; COMTOIS, C.; SLACK, B. *The Geography of Transport System*. 2. ed. New York, USA: Routledge, 2007. v. 1.
- [3] ORTUZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. *Modelling Transport*. 4. ed. Chichester, UK: Wiley, 2011. v. 1.
- [4] KAY, J. *Obliquity: Why our Goals are Best Achieved Indirectly*. 1. ed. London, UK: Profile Books, 2010. v. 1.
- [5] LINDBLOM, C. E. The science of "muddling through". *Public Adm. Rev.*, v. 19, n. 2, p. 19, 79–88, 1959.
- [6] MORAIS, D. M. G.; DIGIAMPIETRI, L. A. Uma revisão acerca dos métodos de simulação envolvendo transporte multimodal. *Rev. Sist. Inf. FSMA*, v. 10, n. 1, p. 2–9, 2012.
- [7] JIN, X.; WHITE, R. An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns. *Comput. Environ. Urban Syst.*, v. 36, n. 5, p. 398–411, 2012.
- [8] KRETZ, T. et al. Quickest paths in simulations of pedestrians. *Adv. Complex Syst.*, v. 14, n. 5, p. 733–759, 2011.
- [9] XUE, Y. et al. Exploring jamming transitions and density waves in bidirectional pedestrian traffic. *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, v. 69, n. 2, p. 289–295, 2009.
- [10] AL-NASUR, S.; KACHROO, P. A microscopic-to-macroscopic crowd dynamic model. In: ABDULHAI, B. et al. (Ed.). *Intelligent Transportation Systems Conference*. Toronto, Canada: IEEE, 2006. v. 1.
- [11] CHEN, M.; B, G. A study of step calculations in traffic cellular automaton models. In: *13th International Intelligent Transportation Systems IEEE Conference*. Funchal, Portugal: IEEE, 2010.
- [12] GAO, L. et al. A delay model of pedestrian-vehicle system on two crossings. In: *5th Advanced Forum on Transportation of China*. Beijing, China: IEEE, 2009. v. 1.
- [13] 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: IEEE, 2008. v. 1.
- [14] HUANG, L.; WU, J. Exploring jamming transitions and density waves in bidirectional pedestrian traffic. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, v. 1, n. 2, p. 13–19, 2009.
- [15] 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: IEEE, 2010. v. 1.
- [16] JUNHUA, W. Pedestrian's critical cross gap and its application in conflict simulation. In: *Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation - Volume 02*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010. v. 02.
- [17] KLUGL, F.; RINDSFUSER, G. Large-scale agent-based pedestrian simulation. In: PETTA, P.; MÜLLER, J.; KLUSCH, M. a. (Ed.). *Multiagent System Technologies*. 1. ed. Berlin / Heidelberg, Germany: Springer, 2007, (Lecture Notes in Computer Science, v. 4687). p. 145–156.
- [18] KOKKINOGENIS LUCIO PASSOS, R. R. Z.; GABRIEL, J. Towards the next-generation traffic simulation tools: a first evaluation. In: *Proceedings of the 6th Doctoral Symposium in Informatics Engineering*. Chaves, Portugal: IEEE, 2011. v. 1.
- [19] 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: IEEE, 2010. v. 1.
- [20] 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, USA: IEEE Computer Society, 2008. v. 1.
- [21] 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.
- [22] MA, J. et al. Dynamic features of pedestrian-vehicle counter flow conflicts. *3rd Int. Conf. Transp. Eng.*, v. 1, n. 1, p. 697–702, 2011.
- [23] 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.
- [24] WANG, L. et al. Mixed flow simulation at urban intersections: Computational comparisons between conflict-point detection and cellular automata models. In: YU, L. et al. (Ed.). *International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. v. 2.
- [25] WANG, T.; CHEN, J. An improved cellular automaton model for urban walkway bi-directional pedestrian flow. In: HOU, Z. (Ed.). *International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009. v. 3.
- [26] 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*, v. 358, n. 1, p. 742–750, 2009.
- [27] USHER, J.; LIU, X.; KOLSTAD, E. Simulation of pedestrian behavior in intermodal facilities. *Spring Simul. Multiconference*, v. 2, n. 3, p. 66–82, 2010.
- [28] BAZZAN, A. L. C.; KLÜGL, F. *Introduction to Intelligent Systems in Traffic and Transportation*. 1. ed. California, USA: Morgan & Claypool Publishers, 2013. '1. (Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning, '1).
- [29] HORNI, A.; NAGEL, K.; AXHAUSEN, K. *Multi-Agent Transport Simulation MATSim*. 1. ed. London, UK: Ubiquity Press, 2016. v. 1.
- [30] CHARYPAR, D.; BALMER, M.; AXHAUSEN, K. W. High-performance traffic flow microsimulation for large problems. In: *88th Annual Meeting of the Transportation Research Board*. Washington, USA: TRB, 2009.
- [31] Companhia do Metropolitano de São Paulo. *Companhia do Metropolitano de São Paulo - Metrô*. Disponível em: <www.metro.sp.gov.br/>.
- [32] WOOLDRIDGE, M. *An Introduction to Multiagent Systems*. 2. ed. Chichester, UK: Wiley, 2002. v. 1.
- [33] Coordenadoria de Pesquisa e Avaliação de Transporte. *Pesquisa Origem e Destino*. 2007.
- [34] 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*, v. 1, n. 1, p. 1–12, 2014.