



Uma revisão acerca dos métodos de simulação envolvendo transporte multimodal

Daniel Marques Gomes de Moraes, *Mestrando em Sistemas de Informação, USP*,
Luciano Antonio Digiampietri, *Professor no Bacharelado em Sistemas de Informação, USP*

Resumo—Um dos desafios atuais no planejamento urbano está relacionado ao planejamento envolvendo os múltiplos meios de transporte disponíveis nas grandes cidades. Uma das maneiras de se avaliar diferentes situações de forma a tomar decisões de como, quando e onde investir é através do uso de simulação multimodal de tráfego. Este artigo apresenta uma revisão acerca da simulação de meios de transporte multimodal, identificando qual o estado da arte e possíveis caminhos para trabalhos futuros sobre o tema.

Palavras-chave—Simulação de meios de transporte, simulação multimodal, transporte público, cidades inteligentes, simulação de transporte público.

A review about multimodal traffic simulation techniques

Abstract—One of the current challenges in urban planning concerns the urban transportation involving multi-mode transportation. One of the ways to evaluate different situations in order to make decisions of how, when and where to invest is using multimodal traffic simulation. This paper presents a review about multimodal traffic simulation, identifying the state of art and directions for future work.

Index Terms—Traffic simulation, multimodal simulation, public transportation, Smart cities, Public Transportation Simulation.

I. INTRODUÇÃO

COM o contínuo aumento da população nas grandes cidades e o impacto causado pelo número crescente de veículos, torna-se necessário o adequado planejamento urbano, buscando minimizar o tempo de deslocamento e aumentar qualidade de vida da população.

O aumento no número de veículos utilizados para o transporte individual, além dos seus conhecidos impactos ambientais, torna penoso o deslocamento nos centros urbanos, principalmente nos chamados “horários de pico”. Além disso, o que demoraria minutos em condições ideais acaba durando, em casos extremos, várias horas de deslocamento em condições estressantes, tanto na utilização de transporte público superlotado, quanto pelo congestionamento das vias de tráfego na utilização de transportes individuais.

Buscando a maior fluidez possível em todas as condições, é importante que as autoridades responsáveis pelo planejamento de sistemas de transporte e vias de tráfego possuam ferramentas adequadas para esta tarefa. Assim sendo, este artigo pretende apresentar uma revisão acerca dos trabalhos feitos sobre sistemas para simulação multimodal de transporte. Pretende-se esclarecer as seguintes questões sobre o tema:

- Quais os trabalhos mais recentes sobre simulações envolvendo mais de um meio de transporte;
- Quais são os métodos de simulação utilizados nestes trabalhos;
- Quais as evoluções propostas pelos autores de tais trabalhos;
- Quais as principais oportunidades de pesquisa no tema.

A revisão apresentada neste artigo é parte de um projeto de pesquisa intitulado “simulação de condições de tráfego urbano utilizando múltiplos meios”, onde pretende-se desenvolver um modelo para a simulação combinada de múltiplos meios de deslocamento urbano, alimentado a partir de informações estatísticas de origem e destino em centros urbanos e dados a respeito de fatores de decisão na escolha de qual meio de transporte utilizar em detrimento de outros. Assim, será possível ao planejador de sistemas de transporte simular a relação de causa e efeito entre os meios. Isto permitirá aperfeiçoar a distribuição dos tipos de transporte identificando as condições de funcionamento nas quais haverá a maior fluidez possível em um dado cenário. Assim, o principal objetivo do projeto de pesquisa é auxiliar no aperfeiçoamento do planejamento de tráfego urbano.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II apresenta uma breve contextualização sobre a temática, de forma a ambientar o leitor com os principais tipos de simulação nesta área. A Seção III contém a descrição na metodologia utilizada nesta pesquisa adotada para a extração e análise dos artigos. A Seção IV contém a análise dos artigos, apresentando considerações gerais e em seguida, aprofundando-se em alguns aspectos de seus conteúdos julgados interessantes para o escopo deste trabalho. A Seção V contém uma breve descrição das principais ferramentas utilizadas para a simulação de transporte. Por fim, na Seção VI são apresentadas as considerações finais

acerca da análise feita e também possíveis caminhos a serem explorados em trabalhos futuros.

II. CONTEXTUALIZAÇÃO

ANTES de descrever a metodologia e a análise dos artigos levantados no processo de revisão, é importante apresentar alguns conceitos relacionados à classificação da simulação de tráfego que serão mencionados no decorrer deste trabalho.

A simulação de transporte multimodal é a simulação que engloba mais de um meio de transporte ou deslocamento. Esta simulação pode envolver os diversos meios de transporte motorizados (públicos e privados) além de meios não motorizados, como o deslocamento a pé e de bicicleta.

Segundo Barceló [2], pode-se classificar a simulação de tráfego de veículos em três tipos de modelagem: microscópica, macroscópica e mesoscópica.

A simulação microscópica é “baseada na descrição do movimento de cada veículo individual que compõe o fluxo de tráfego” [2], na qual cada aspecto e comportamento relevante de um dado veículo devem ser considerados: aceleração, desaceleração, mudanças de faixa, entre outros, dependendo do contexto.

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” [2]. Ou seja, diferentemente da simulação microscópica que toma como base o indivíduo, a simulação macroscópica considera a massa de veículos como algo único e o que é estudado é justamente seu comportamento. Sua origem remete diretamente a estudos em mecânica dos fluidos.

Por fim, a simulação mesoscópica “consiste na simplificação oque busca capturar os pontos essenciais da dinâmica enquanto demanda menos dados, sendo assim “mais eficientes computacionalmente em relação a modelos microscópicos” [2]. Este modelo procura unir alguns aspectos da simulação microscópica com aspectos da simulação macroscópica, para melhor representar o comportamento dinâmico.

Não necessariamente estes três modelos propostos são relativos apenas à simulação de veículos, sendo possível entendê-los como sendo válidos também para outras formas de deslocamento, por exemplo, de pedestres. Isto poderá ser observado pela utilização desta terminologia nos trabalhos analisados.

III. METODOLOGIA

DE forma a identificar os artigos relacionados com o estado da arte da área, foi realizado um processo de revisão. Tal processo teve como base de elaboração a pesquisa exploratória feita anteriormente, de forma a familiarizar os autores com os principais termos e conceitos relacionados ao campo de estudo objetivado. A partir de tal exploração foram identificadas as palavras-chave relativas aos conceitos relacionados às questões colocada e suas possíveis variações para o contexto, apresentadas

na Tabela I. Deve-se observar que os termos mencionados foram utilizados em conjunto, de forma a contextualizar os termos mais genéricos em relação ao objetivo.

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 foram desconsideradas, uma vez que há muito ruído nos resultados (artigos sem acesso na íntegra, por exemplo, não necessariamente permitem a correta interpretação dos resultados, ficando seu significado restrito pela interpretação daquele que os cita). Sendo assim, foram adotadas as seguintes fontes:

- ACM: ACM Digital Library
- IEEE: IEEEExplore
- Springer: Springer Link
- Elsevier: SciVerse Scopus

Note-se também que estas são as fontes mais respeitadas dentro da comunidade científica, tendo dentre suas publicações grande parte daquelas que estão nos estratos superiores das classificações de qualidade, tais como o QUALIS.

Para cada uma das fontes de dados foi elaborada uma chave de busca a partir do conjunto de palavras-chave anteriormente exposto. Era possível que não obrigatoriamente todos os termos irão aparecer, uma vez que, em alguns casos, a busca tornava-se demasiadamente restritiva. Por exemplo, diversos dos artigos selecionados não contém em seu título ou resumo a expressão *Intelligent Transportation Systems*.

A Tabela II apresenta as chaves utilizadas para cada fonte e a opção de busca utilizada. Também foi adicionado um filtro de forma a obter apenas os artigos publicados nos últimos cinco anos, permitindo assim, identificar o estado atual da pesquisa na área.

Tendo em vista que alguns termos são utilizados em mais de um domínio, tais como *traffic* e *simulation*, foram acrescentadas condições negativas nas chaves de busca, de forma a eliminar resultados não condizentes com a pesquisa. Por exemplo, as palavras tráfego e simulação são muito usadas em trabalhos de otimização de transmissão de dados em redes de comunicação. Para evitar artigos sobre tráfego de dados, foram excluídos trabalhos que possuísem as palavras-chave *broadband* e *wireless*.

Após encontrar e copiar os artigos de acordo com as chaves de busca apresentadas, um filtro (ou seleção) dos artigos foi feito com base na leitura do *abstract* de cada um dos resultados encontrados, levando em conta quatro critérios de inclusão e quatro critérios de exclusão, onde, para ser aceito, o artigo deve se enquadrar em ao menos um critério de inclusão e em nenhum dos critérios de exclusão:

- Inclusão 1: Trabalhos que apresentem sistemas inteligentes de transporte que envolvam implementação de simulação multimodal;
- Inclusão 2: Trabalhos que apresentem um panorama sobre trabalhos com Sistemas Inteligentes de Transporte que envolvam implementação de simulação;

Palavras-Chave	Variações
Intelligent Transportation Systems	ITS
Multimodal	Mixed
Urban Planning	Planning
Traffic Simulation	Simulation
Public Transportation	-
Pedestrian	-

TABELA I
CONJUNTO DE PALAVRAS-CHAVE E SUAS RESPECTIVAS VARIAÇÕES

Fonte	Chave de Busca	Condições de Filtragem
ACM Digital Library	“Abstract”：“Traffic” AND “Abstract”：“Simulation” AND (“Abstract”：“Pedestrian*” OR “Abstract”：“public transportation” OR “Abstract”：“Multimodal”) NOT “Abstract”：“Network” NOT “broadband” NOT “Wireless”	Busca avançada, com varredura apenas no campo <i>abstract</i> .
IEEEExplore	“Abstract”：“Traffic” AND “Abstract”：“Simulation” AND (“Abstract”：“Pedestrian*” OR “Abstract”：“public transportation” OR “Abstract”：“Multimodal”) NOT “Abstract”：“Network*” NOT “Abstract”：“air*” NOT “broadband” NOT “Wireless”	Busca avançada, com o filtro “ <i>Metadata only</i> ” ativo.
Springer Link	“Abstract”：“Traffic” AND “Abstract”：“Simulation” AND “Abstract”：“Pedestrian*” OR “Abstract”：“public transportation” OR “Abstract”：“Multimodal”) NOT “Abstract”：“Network*” NOT “Abstract”：“air*” NOT “broadband” NOT “Wireless”	Busca avançada, com o filtro “ <i>Metadata only</i> ”ativo.
SciVerse Scopus	ABS(traffic) AND ABS(simulation) AND (ABS(pedestrian) OR ABS(multimodal) OR ABS(“Public Transportation”)) AND NOT ABS(wireless) AND NOT ABS(broadband) AND NOT ABS(network) AND NOTABS(automation)	Busca avançada, restringindo publicações e conferências de áreas pertinentes: Computação, Engenharias civil, tráfego, planejamento urbano e correlatas.

TABELA II

CHAVES DE BUSCA E CONDIÇÕES UTILIZADAS CONFIGURADAS ESPECIFICAMENTE PARA CADA FONTE DE DADOS. DIFERENTES CHAVES FORAM USADAS PARA GARANTIR QUE OS TRABALHOS RELEVANTES FOSSEM ENCONTRADOS E EVITAR QUE MUITOS TRABALHOS IRRELEVANTES FOSSEM SELECIONADOS.

- Inclusão 3: Trabalhos que apresentem Sistemas Inteligentes de Transporte que, a despeito de envolver um componente apenas, envolva implementação de simulação com outro tipo de componente (pedestres, por exemplo) mesmo que apenas de forma a identificar o efeito deste segundo componente sobre o primeiro;
- Inclusão 4: Trabalhos que apresentem implementação de simulação para outros tipos de deslocamento urbano, que não veículos (por exemplo, pedestres, ou focado em meios de transporte público);
- Exclusão 1: Trabalhos que apresentem sistemas inteligentes de transporte que implementem simulação apenas para veículos;
- Exclusão 2: Trabalhos sobre Sistemas Inteligentes de Transporte envolvidos com outros tipos de transporte que não sejam voltados para deslocamento urbano (balsas para transposição de rios ligando dois pontos de uma dada cidade, por exemplo, não se enquadram nesta restrição);
- Exclusão 3: Trabalhos que não implementem simulações de tráfego / fluxos ou que não estejam envolvidos com simulação voltada ao transporte urbano;
- Exclusão 4: Trabalhos que não estejam disponíveis na íntegra para acesso.

Os artigos selecionados foram lidos na íntegra e foi feito o levantamento dos pontos relevantes em cada um deles, identificando que tipo de simulação é feita, qual o objetivo da simulação, os meios previstos, como cada um deles é tratado no sistema e os trabalhos futuros sugeridos pelos autores. A partir destes dados foi feita a análise exposta adiante.

IV. CONDUÇÃO

DAS quatro fontes de dados pesquisadas foram encontrados 143 artigos condizentes com os critérios de seleção, distribuídos de acordo com o gráfico da Figura 1.

Na base de dados IEEEExplore, foram selecionados 13 artigos na análise dos resumos a partir do enquadramento

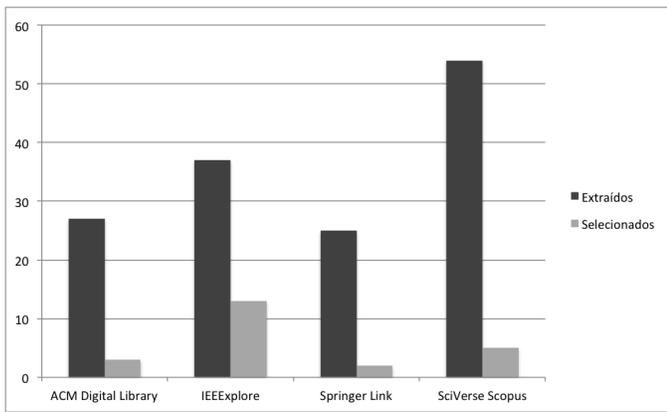


Fig. 1. Distribuição de artigos por fonte de dados, encontrados e selecionados. O somatório excede o número total de artigos encontrados pois alguns artigos constam em mais de uma fonte de dados.

nas condições de inclusão e exclusão. Ainda a respeito desta base, um dos artigos apresentou duas ocorrências, já que foi veiculado em mais de uma publicação. Com relação à ACM Digital Library, foram selecionados três artigos, sendo que todos eles encontravam-se entre os selecionados a partir do IEEEExplore. Nesta base também houve incidência de cinco artigos que, a despeito de se enquadrarem (ao menos pela análise preliminar, do resumo), não estavam disponíveis para acesso, o que inviabilizou suas análises. Na fonte de dados Springer Link, foram encontrados 25 artigos, dos quais cinco artigos foram removidos por não ter sua versão na íntegra disponível para acesso e dois foram selecionados pelos critérios anteriormente expostos. Por fim, na base SciVerse Scopus, foram localizados 54 artigos, dos quais cinco foram selecionados e do restante, seis não estavam disponíveis para acesso, e um estava presente na lista de selecionados da base IEEEExplore.

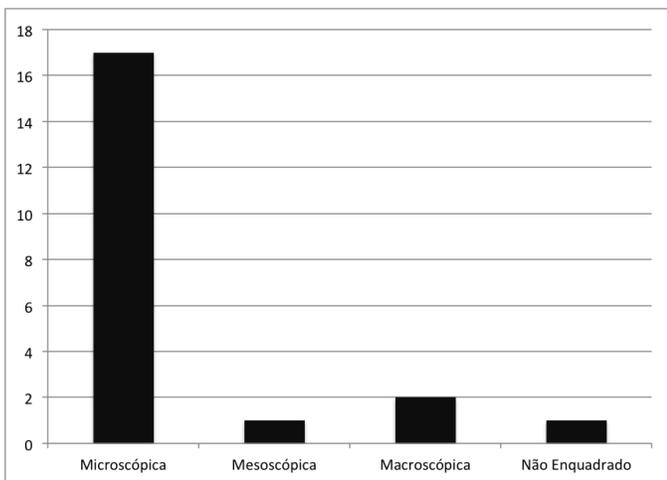


Fig. 2. Distribuição dos artigos pelo tipo de simulação efetuada

Os artigos selecionados foram classificados de acordo com o tipo de simulação utilizada: microscópica, mesoscópica, macroscópica ou não enquadrado, sendo este último para classificar simulações que possuem características que não se enquadram em nenhum dos

modelos apresentados, apesar de representar componentes do sistema de tráfego. A distribuição dos artigos pelo tipo de simulação é apresentada no gráfico da Figura 2.

Dentre os trabalhos, nota-se a grande concentração na área de “simulação microscópica”, havendo apenas uma menção a modelos mesoscópicos, e apenas dois caracterizados como “simulação macroscópica”, sendo que em um destes artigos, foram utilizados os dois modelos, conforme será exposto na análise dos artigos. Um dos resultados foi classificado como “não enquadrado” uma vez que o trabalho apresentado não tinha por objetivo a simulação de densidade de tráfego, mas sim a otimização de uma rede de transportes usando para tanto, todavia, uma simulação de deslocamento e comportamentos atribuídos aos agentes.

A prevalência de simulações microscópicas era esperada por ser a simulação que, por representar cada veículo ou pessoa de maneira individual, possibilita a simulação detalhada de condições reais de tráfego.

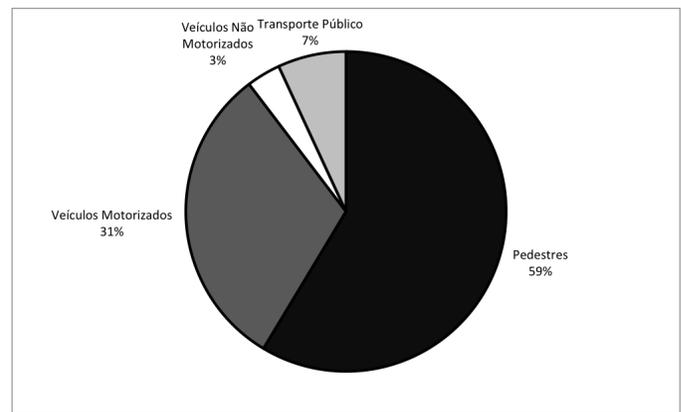


Fig. 3. Distribuição dos artigos de acordo com o meio de deslocamento abordado

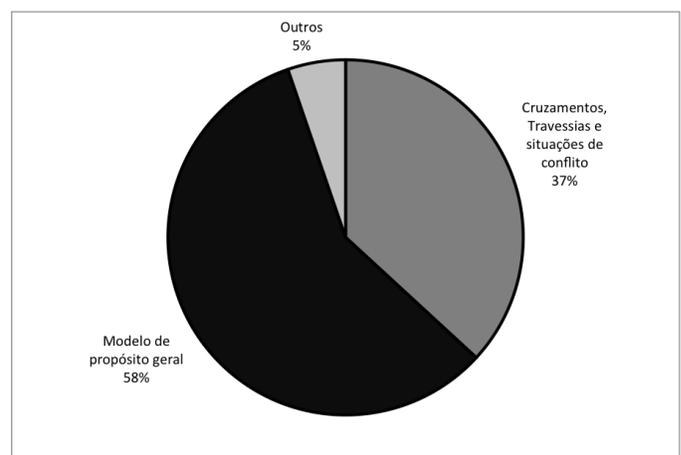


Fig. 4. Distribuição dos artigos de acordo com o objetivo da simulação

A distribuição dos trabalhos quanto aos meios previstos pode ser vista na Figura 3. Apesar da maioria dos trabalhos envolvendo simulação de tráfego ser a respeito de veículos motorizados, quando envolvemos mais de um

meio, como foi feito nesta pesquisa, há a predominância do pedestre como componente principal.

Considerando os modelos de simulação de deslocamento, a maioria das propostas estudadas é de propósito geral ou a combinação entre pedestres e veículos (tipicamente em situações de cruzamento), conforme pode ser observado na Figura 4. Em relação ao objeto da simulação, um dos trabalhos enquadra-se na categoria “outros”, destinada a trabalhos que não necessariamente estejam aplicados a simulação de tráfego.

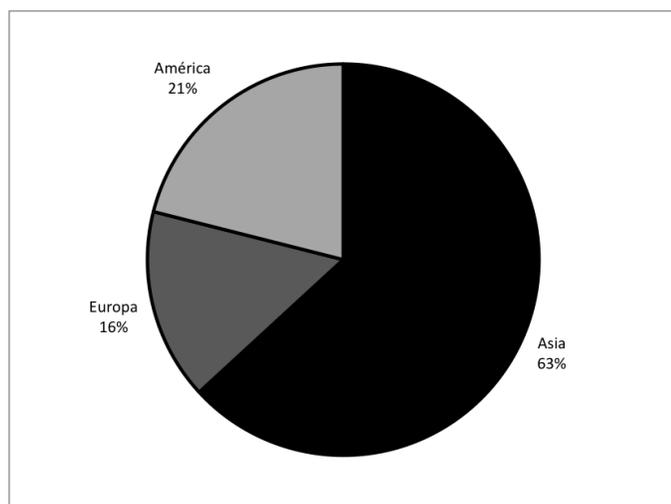


Fig. 5. Distribuição geográfica dos artigos

Chama a atenção a distribuição geográfica das instituições nas quais os autores estão vinculados (Figura 5). Há uma presença massiva de instituições asiáticas, mais especificamente chinesas, dentre os artigos analisados para este trabalho. Imagina-se que tal presença deve-se principalmente às condições demográficas, e ao amplo crescimento econômico e científico de alguns países dessa região. Estes fatores têm levando a um grande aumento do número de automóveis em circulação sem o devido acompanhamento em infraestrutura e segurança, resultando em altos índices de acidentes, conforme apontado como justificativa em diversos dos trabalhos analisados.

A respeito do conteúdo dos artigos, quando há a presença de pedestres, os principais métodos escolhido para a simulação do comportamento dos mesmos são: a utilização de autômatos celulares, caso dos artigos [3, 8, 10, 14, 19], a abordagem por agentes (simulação microscópica), utilizada nos artigos [11, 12, 18, 21], ou a utilização de uma ferramenta voltada para simulações microscópicas, o VISSIM¹, da empresa PTV², caso dos artigos [4, 15–17], os quais não especificam a parametrização da ferramenta para a construção da simulação. Alguns artigos apresentam propostas diferentes para a simulação. Em [22] é apresentado um modelo baseado em hidrodinâmica para a simulação de multidões, ou seja, um modelo macroscópico. O artigo [9] utiliza um modelo que, a despeito de ser

baseado em agentes, utiliza algumas abstrações características de simulações macroscópicas, resultando em um modelo mesoscópico, o único encontrado na realização desta pesquisa.

Para a simulação de veículos, o modelo mais utilizado é o *car following* ou alguma variação dele [8, 19]. O modelo *car following* é caracterizado por possuir uma equação diferencial ordinal que descreve de maneira completa a dinâmica da posição e velocidade de cada veículo, usando como parâmetros a posição do veículo, sua velocidade e a distância com o próximo veículo (ou com qualquer outro obstáculo).

Em alguns casos, o papel do veículo é secundário na simulação, então os autores optaram por simplificar a representação dos mesmos (em geral limitando o comportamento a variações de aceleração ou ocupação de espaço no ambiente), o que pode ser observado no artigo [14].

Dois artigos propuseram melhorias nas transições do modelo de autômatos celulares [3, 19]. O primeiro apresenta um conjunto de regras pré-definidas para o deslocamento bidimensional neste modelo, enquanto o segundo propõe uma abordagem mais complexa, envolvendo variáveis probabilísticas na tomada de decisão da direção a ser seguida no deslocamento, prevendo que o modelo atenda não apenas situações de mudança de direção (deslocamento bidimensional) como também mudanças no deslocamento unidimensional. Os artigos [8, 10, 14], por sua vez, utilizam o modelo de autômatos sem variações para implementar a simulação em seus respectivos cenários.

Quatro trabalhos utilizam o modelo de agentes [11, 12, 18, 21] para simular o processo de decisão dos pedestres, na escolha do melhor caminho. Destes, três artigos [11, 18, 21] apresentam simulações que visam a entender o processo de deslocamento de pedestres como um todo, enquanto o trabalho [12] se preocupa unicamente com o processo de decisão na escolha do caminho mais rápido, considerando a presença de outros pedestres na rota escolhida, tempo estimado e possíveis obstáculos. Em todos os trabalhos, apesar da criação de ambientes de simulação específicos, os autores mencionam que tais modelos podem ser utilizadas em diversos tipos de ambiente, o que parece ser bastante condizente com a descrição destes trabalhos.

A utilização de lógica fuzzy é levada em consideração na tomada de decisão nos estudos realizados em [6, 7, 16]. O primeiro utiliza variáveis fuzzy para controlar o processo de tomada de decisão por um semáforo inteligente, visando a diminuir o tempo de espera, tanto para o pedestre quanto para veículos. Os outros dois simulam o processo de tomada de decisão e planejamento de caminho adotado por um ciclista para atravessar um cruzamento, a partir da análise de obstáculos presentes, velocidade, caminhos possíveis e risco de colisões.

No artigo [1] os autores propõem um modelo de simulação macroscópica para pedestres, o qual é construído a partir de um modelo microscópico, visando a suprir a ausência de modelos para tratar comportamento de multidões, conforme mencionado pelos autores.

Por fim, o artigo [13] apresenta o planejamento e simula-

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

²<http://www.ptvamerica.com>

ção da utilização de táxis coletivos, ou seja, táxis tomados por mais de um passageiro, com destinos distintos. Nesse artigo não foi utilizado nenhum método de simulação relacionado a tráfego de veículos, mas sim apresentado um modelo utilizando um grafo, de forma a representar um setor de Paris e o deslocamento dos táxis por este grafo, aceitando ou não passageiros de acordo com um processo de decisão definido.

Na grande maioria dos trabalhos analisados, o fator mais marcante é a constante menção à pobreza de dados disponíveis sobre as situações analisadas, o que reduz a efetividade das validações das simulações e modelos propostos. Nestes artigos, os autores mencionam como próximos passos a obtenção de dados empíricos para então realizar uma validação mais extensa de seus modelos [3, 21]. Apenas o artigo [7] explica detalhadamente como a validação do modelo foi realizada, usando como base dados empíricos coletados, enquanto alguns artigos chegam a mencionar a necessidade de se validar o modelo em trabalhos futuros mas, no geral, não é mencionada a questão da validação dos modelos.

A respeito de sugestões de trabalhos futuros, a maioria dos trabalhos propõem refinamentos dos modelos desenvolvidos [3, 7, 10, 20] ou a validação dos trabalhos através de coleta de dados e pesquisas empíricas [1, 3, 17, 20, 21]. Os artigos restantes não apresentam direcionamentos neste sentido, porém, conforme mencionado anteriormente, é perceptível a ausência de validações dos modelos apresentados. Por mais que seja bastante difícil de se validar esses modelos com dados reais, este tipo de validação é fundamental tanto para assegurar a qualidade do trabalho quanto para indicar a viabilidade da solução em situações reais.

V. FERRAMENTAS PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

DURANTE a revisão dos artigos selecionados neste trabalho foram identificadas algumas ferramentas para a simulação de tráfego. Nesta seção, estas ferramentas serão brevemente apresentadas, sendo que suas características foram extraídas dos sites de seus desenvolvedores ou empresas responsáveis. Não fez parte do escopo deste trabalho testar cada uma das ferramentas.

Devido à grande diferença das características apresentadas pelas ferramentas, optou-se por utilizar um pequeno texto descritivo sobre cada uma delas, ao invés do uso de uma tabela comparativa. Muitas das funcionalidades estão relacionadas à avaliação da simulação (congestionamentos, velocidade média alcançada pelos veículos, etc) e não somente às características da simulador propriamente dito. A seguir, as ferramentas são apresentadas em ordem alfabética. Análises e comparações detalhadas sobre ferramentas de simulação de tráfego podem ser encontradas em [5, 23].

*Aimsun*³ é uma ferramenta que permite a modelagem e simulação microscópica, macroscópica e mesoscópica. Entre suas principais características estão a eficiência,

por permitir a simulação em tempo real de modelos com mais de 10.000 intersecções (com 5.000 Km de vias) em um computador pessoal, usando uma arquitetura multinúcleos; presença de dois modelos para simular o comportamento do motorista: *dynamic user equilibrium* e modelo estocástico de decisão de rotas (integrados aos modelos *car following* e *lane-changing*); e simulação da interação entre pedestres e veículos (sendo capaz de simular mais de 30.000 pedestres). Algumas das principais aplicações da ferramenta, segundo a empresa responsável, são: simulação e análise da utilização de vias reversíveis e vias reservadas em horários específicos, mudança no funcionamento dos semáforos, análise de impacto da construção de novas vias, avaliação do transporte público, análise de segurança e previsão do tráfego durante grandes eventos.

*PARAMICS*⁴ possibilita a modelagem dinâmica de vias (por exemplo, vias reversíveis ou vias exclusivas para ônibus em horários específicos), bem como do transporte público (rotas e horários dos serviços de transporte, incluindo modelagem das paradas dos ônibus e entrada e saída dos passageiros). Permite a descrição de diferentes classes de veículos com atributos como tipo, propósito da viagem e dinâmica. Cada veículo possui um atributo (configurado pelo usuário) para descrever a agressividade ou a cautela do motorista na tomada de decisão. A decisão de troca ou manutenção de pista (por parte do motorista) é baseada na distância necessária para a próxima manobra. É também modelada a direção colaborativa em congestionamentos. Quanto à decisão sobre a rota a ser seguida, a ferramenta permite uma ampla variação desde todos os carros seguindo uma rota fixa até todos os carros utilizando rotas dinâmicas (baseadas em métodos estocásticos). A escolha de rotas dinâmicas também leva em consideração o estado atual de congestionamento observado pelo motorista. Como funcionalidades de análise da simulação, destacam-se: análise comparativa entre diferentes modelos ou situações simuladas; análise de múltiplas execuções de uma mesma situação; quantificações de velocidades médias, emissão de poluentes, atrasos e eventos; análise de saturação; e análise do custo de rotas alternativas.

*SUMO*⁵ é uma ferramenta código-aberto para a simulação usando o modelo microscópico. Entre suas principais características estão sua eficiência (capacidade de simular em um computador pessoal 10.000 ruas com 100.000 veículos); modelagem de diferentes tipos de veículos; diversos algoritmos para o estabelecimento de rotas; modelagem de vias paralelas permitindo a mudança dinâmica do sentido de vias; e comportamentos personalizados para cada semáforo.

*VISSIM*⁶ é um simulador desenvolvido pela empresa PTV⁷ que utiliza o modelo microscópico. Suas principais funcionalidades são: mudança de faixa de um veículo considerando três critérios (benefício mínimo necessário

⁴<http://www.sias.com/ng/spcurrentrelease/spcurrentrelease.htm>

⁵<http://sumo.sourceforge.net>

⁶<http://www.ptvamerica.com/software/ptv-vision/vissim>

⁷<http://www.ptvamerica.com>

³http://www.aimsun.com/wp/?page_id=21

para mudar de faixa, velocidade mínima necessária para fazer a mudança e tempo gasto), além da modelagem de comportamento cooperativo (quando um motorista evita situações de risco durante a mudança de faixa) e não cooperativo; tempo variável para se estacionar o carro de acordo com o tipo e tamanho da vaga; aceleração e desaceleração suaves ao se distanciar ou aproximar de obstáculos; e rotas projetadas considerando a situação atual de trânsito e a previsão do trânsito para os instantes seguintes. Além desta ferramenta, a empresa PTV também possui um simulador de pedestres (*VISWALK*⁸) que pode ser usado juntamente com o simulador de tráfego.

VI. CONCLUSÕES

ESTE artigo apresentou uma revisão acerca do estado da arte dos métodos de simulação multimodal de transporte urbano. Pelos artigos analisados, nota-se um grande volume de trabalhos envolvendo simulações microscópicas de situações de cruzamento e semáforos, mostrando uma preocupação dos autores com a eficiência e otimização de tempo nestas situações e também a tentativa de identificar e reduzir as condições de acidentes nestes pontos.

Também é evidenciada pelos artigos a posição consolidada dos modelos de autômatos celulares para a simulação de comportamento de pedestres e também do modelo *car following* para a simulação de comportamento de veículos, além da constante utilização da ferramenta VISSIM para simulações.

Algo que chama a atenção é a pequena presença de modelos devidamente validados, evidenciada pelas poucas informações empíricas coletadas para os cenários propostos e também pelas dificuldades técnicas e operacionais neste sentido, visto o grande volume de trabalho necessário, o que faz questionar a eficiência do poder público na extração de tais informações e consequentemente utilização para planejamento, o que pode ser abordado em pesquisas futuras.

Por fim, outro ponto que chama a atenção na revisão, é a ausência de menções a sistemas de transporte público, com exceção de um modelo alternativo proposto e um trabalho que estuda o processo de decisão do usuário, ou seja, como meio auxiliar (sem a simulação do meio em si), assim como nenhum estudo que envolva de fato mais de um meio de transporte com uma visão global sobre eficiência e relações de causa e efeito, sendo estes dados indicativos de pontos passíveis de exploração em trabalhos futuros. Este tema em particular é extremamente importante ao se pensar em cidades inteligentes e, até o momento, foi muito pouco trabalhado.

Como trabalho futuro, pretende-se estender uma das ferramentas de simulação de tráfego de modo a permitir a análise do impacto causado por mudanças no transporte público sobre trilhos no trânsito das grandes cidades.

⁸<http://www.ptvamerica.com/software/ptv-vision/viswalk>

REFERÊNCIAS

- [1] S. Al-nasur and P. Kachroo, “A microscopic-to-macroscopic crowd dynamic model,” in *Intelligent Transportation Systems Conference, 2006 (ITSC '06)*, 2006, pp. 606–611.
- [2] J. Barceló, Ed., *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer, 2010.
- [3] M. Chen, G. Bärwolff, and H. Schwandt, “A study of step calculations in traffic cellular automaton models,” in *Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2010 13th International IEEE Conference on*, 2010, pp. 747–752.
- [4] L. Gao, Z. Liu, Q. Xu, and X. Feng, “A delay model of pedestrian-vehicle system on two crossings,” in *Advanced Forum on Transportation of China (AFTC 2009)*, 2009, pp. 192–198.
- [5] H. V. Hallmann and A. L. C. Bazzan, “Comparação entre softwares simuladores de trânsito,” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tech. Rep., 2011.
- [6] L. Huang and J. Wu, “Cyclists’ path planning behavioral model at unsignalized mixed traffic intersections in china,” in *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, vol. 1, 2009, pp. 13–19.
- [7] —, “Fuzzy logic based cyclists’ path planning behavioral model in mixed traffic flow,” in *11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2008)*, 2008.
- [8] W. Huixin and W. Wenhong, “Microscopic dynamic simulation model for pedestrian-vehicle mixed traffic,” in *International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT)*, 2010.
- [9] X. Jin and R. White, “An agent-based model of the influence of neighbourhood design on daily trip patterns,” *Computers, Environment and Urban Systems*, vol. 36, no. 5, pp. 398–411, 2012.
- [10] W. Junhua, “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*, ser. ICICTA '10, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010, pp. 889–892.
- [11] F. Klügl and G. Rindsfuser, “Large-scale agent-based pedestrian simulation,” in *Proceedings of the 5th German conference on Multiagent System Technologies*, ser. MATES '07, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, pp. 145–156.
- [12] T. Kretz, A. GroBe, S. Hengst, L. Kautzsch, A. Pohlmann, and P. Vortisch, “Quickest paths in simulations of pedestrians,” *Advances in Complex Systems*, vol. 14, no. 5, pp. 733–759, 2011.
- [13] E. Lioris, G. Cohen, and A. de La Fortelle, “Overview of a dynamic evaluation of collective taxi systems providing an optimal performance,” in *IV IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, 2010, pp. 1110–1115.

- [14] J. Ma, S. Lo, X. Xu, and W. Song, "Dynamic features of pedestrian-vehicle counter flow conflicts," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Transportation Engineering*, cited By (since 1996) 0, 2011, pp. 697–702.
- [15] W. Ma and X. Yang, "Signal coordination models for midblock pedestrian crossing and adjacent intersections," in *Proceedings of the 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation - Volume 02*, ser. ICICTA '09, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 193–196.
- [16] W. Ma, W. Ma, and X. Yang, "Development and evaluation of a fuzzy logic control approach for pedestrian crossing," in *Proceedings of the 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation - Volume 01*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008, pp. 882–886.
- [17] M. Pan, S. Dong, J. Sun, and K. Li, "Microscopic simulation research on signal cycle length of mixed traffic considering violation," in *Proceedings of the 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation - Volume 02*, ser. ICICTA '10, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2010, pp. 674–678.
- [18] J. Usher, X. Liu, and E. Kolstad, "Simulation of pedestrian behavior in intermodal facilities," in *Proceedings of the 2010 Spring Simulation Multiconference*, 2010.
- [19] L. Wang, B. Mao, S. Chen, and K. Zhang, "Mixed flow simulation at urban intersections: computational comparisons between conflict-point detection and cellular automata models," in *Proceedings of the 2009 International Joint Conference on Computational Sciences and Optimization - Volume 02*, ser. CSO '09, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 100–104.
- [20] T. Wang and J. Chen, "An improved cellular automaton model for urban walkway bi-directional pedestrian flow," in *Proceedings of the 2009 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation - Volume 03*, Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2009, pp. 458–461.
- [21] J. Xiaobei, X. Hui, and G. Hongwei, "Analysis of crowd behavior in route choice based on dynamic programming," in *Proceedings of the 9th International Conference of Chinese Transportation Professionals, ICCTP 2009: Critical Issues in Transportation System Planning, Development, and Management*, vol. 358, 2009, pp. 742–750.
- [22] Y. Xue, H.-H. Tian, H.-D. He, W.-Z. Lu, and Y.-F. Wei, "Exploring jamming transitions and density waves in bidirectional pedestrian traffic," *The European Physical Journal B - Condensed Matter and Complex Systems*, vol. 69, pp. 289–295, 2 2009.
- [23] R. R. Zafeiris Kokkinogenis Lúcio Passos and J. Gabriel, "Towards the next-generation traffic simulation tools: a first evaluation," in *Proceedings of the 6th Doctoral Symposium in Informatics Engineering*, 2011, p. 14.

Daniel Marques Gomes de Morais é formado em Sistemas de Informação pela Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH / USP - 2009). Atualmente cursa o Mestrado em Sistemas de Informação pela Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo e é Especialista em Desenvolvimento Tecnológico na Fundação do Desenvolvimento Administrativo do Estado de São Paulo (FUNDAP).



Luciano Antonio Digiampietri (autor correspondente) possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Campinas (2002) e doutorado em Ciência da Computação pela Universidade Estadual de Campinas (2007). Desde abril de 2008 é professor pesquisador no Bacharelado em Sistemas de Informação na Escola de Artes, Ciências e Humanidades da Universidade de São Paulo (EACH-USP) e desde 2010 é docente permante no Programa de Mestrado em

Sistemas de Informação da Universidade de São Paulo. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Biologia Computacional, Bancos de Dados e Inteligência Artificial, atuando principalmente nos seguintes temas: workflows científicos, bioinformática, proveniência de dados, composição automática de serviços, rastreabilidade de experimentos e algoritmos.
E-mail: digiampietri@usp.br.