



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

Centro de Tecnologia e Urbanismo
Departamento de Engenharia Elétrica

Leonardo Mota Pinheiro

Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microssimulação de Tráfego Urbano

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
da Universidade Estadual de Londrina
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Londrina, PR
2011



Leonardo Mota Pinheiro

Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microsimulação de Tráfego Urbano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Tráfego
Especialidade: Microsimulação de Tráfego Urbano

Orientador:
Profa. Dra. Sílvia Galvão de Souza Cervantes

Londrina, PR
2011

Ficha Catalográfica

Mota Pinheiro, Leonardo

Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microsimulação de Tráfego Urbano. Londrina, PR, 2011. 59 p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, PR. Departamento de Engenharia Elétrica

1. Engenharia de Tráfego. 2. Microsimulação de Tráfego Urbano. I. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Engenharia Elétrica. Departamento de Engenharia Elétrica . II. Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microsimulação de Tráfego Urbano.

Leonardo Mota Pinheiro

Uma Integração de Soluções em Software Livre Aplicada à Microssimulação de Tráfego Urbano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Engenharia de Tráfego
Especialidade: Microssimulação de Tráfego Urbano

Comissão Examinadora

Profª. Dra. Sílvia Galvão de Souza Cervantes
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina
Orientadora

Prof. Dr. Paulo Cesar Marques da Silva
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental
Faculdade de Tecnologia - Universidade de Brasília

Prof. Dr. José Alexandre de França
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

Prof. Dr. Leonimer Flávio de Melo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Estadual de Londrina

Londrina, 07 de fevereiro de 2011

A minha família e a todos que, de uma forma ou de outra, me incentivaram
nesta fase de minha vida.

Agradecimentos

À minha esposa, Éryka, pela compreensão e paciência, até nos momentos mais difíceis.

Aos meus filhos, Luca e Sara, que apesar de não entenderem muito ainda, são a razão de tudo que eu faço.

Aos meus irmãos, Rafael e Thalita, pela inspiração e ajuda incondicional.

À minha orientadora, Silvia, pelos ensinamentos, disponibilidade, compreensão, apoio e principalmente, (extrema) paciência.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho da UEL, pelo incentivo, apoio e compreensão.

Às Dras. Sonia Sella e Maria Stela Lessa Paganelli, por me ajudarem a enxergar as árvores em meio à floresta.

Ao IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina-PR) pelo fornecimento de dados para a pesquisa.

À Universidade Estadual de Londrina, que, desde a minha infância, sempre foi minha segunda casa.

Ao meu pai, Aécio, pelo exemplo de vida, amor e inspiração.

À minha mãe, Francisca, que sem sombra de dúvida foi a grande incentivadora deste trabalho, antes mesmo dele começar. Este é para você.

Resumo

Este trabalho apresenta um estudo sobre soluções e ambientes de microsimulação de tráfego urbano, com o foco principal em uma solução baseada em software livre. Existem várias soluções e pacotes comerciais para microsimulação, porém estas soluções são fornecidas como *caixas pretas*, não permitindo a mudança ou adaptação dos modelos utilizados e, em algumas situações, nem os seus parâmetros. Uma solução em software livre é apresentada para a microsimulação de tráfego, sendo que esta pode ser estendida ou adequada de maneira a contemplar as diferentes realidades existentes, seja através da liberdade de manipulação de seus parâmetros ou da customização dos modelos utilizados.

Abstract

This work presents a study on urban traffic simulation packages and tools, with the main focus on open source tools. There are many commercial solutions and simulation packages but they are often provided as 'black boxes' and do not allow changes to the models they use, and in some cases, even their parameters. An open source solution is presented and can be extended in order to fit different scenarios and local realities through the liberty on parameter manipulation or even the customization of the underlying traffic models.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 1 |
| 1.1 | Motivação | 2 |
| 1.1.1 | Software Livre | 2 |
| 1.2 | Proposta | 7 |
| 1.3 | Organização | 8 |
| 2 | Modelagem e Simulação de Tráfego | 10 |
| 2.1 | Simulação de Tráfego | 10 |
| 2.2 | Modelando fluxos de tráfego | 12 |
| 2.3 | Classificação dos modelos de tráfego por nível de agregação | 13 |
| 2.3.1 | Modelos microscópicos | 13 |
| 2.3.2 | Modelos macroscópicos | 16 |
| 2.3.3 | Modelos mesoscópicos | 16 |
| 2.4 | Sistemas Comerciais de Simulação de Tráfego Urbano | 17 |
| 2.4.1 | AIMSUN - <i>Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks</i> | 18 |
| 2.4.2 | DRACULA - <i>Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation</i> | 19 |
| 2.4.3 | CORSIM - <i>Corridor Simulation</i> | 19 |
| 2.4.4 | INTEGRATION - <i>Dynamic Traffic Assignment and Simulation Software</i> | 20 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3 | Microsimulação de Tráfego Usando Software Livre | 22 |
| 3.1 | Construção de ambientes de simulação de tráfego | 22 |
| 3.1.1 | Definição dos cenários | 23 |
| 3.1.2 | Levantamento e codificação dos dados | 23 |
| 3.1.3 | Simulação dos cenários avaliados | 28 |
| 3.1.4 | Calibração e validação do modelos | 32 |
| 3.1.5 | Documentação e análise dos resultados | 37 |
| 4 | Microsimulação de Tráfego com Software Livre na Implantação de Corredores Exclusivos para Ônibus | 38 |
| 4.1 | Introdução | 38 |
| 4.2 | Procedimentos e aplicação para estudo da solução em software livre | 41 |
| 4.2.1 | Definição dos cenários | 41 |
| 4.2.2 | Levantamento e codificação dos dados | 42 |
| 4.2.3 | Simulação dos cenários avaliados | 49 |
| 4.2.4 | Calibração e validação do modelo | 50 |
| 4.2.5 | Documentação e análise dos resultados | 51 |
| 5 | Conclusões e Trabalhos Futuros | 54 |
| 5.1 | Agradecimentos | 56 |
| | Referências | 57 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Software Livre vs Software Proprietário | 7 |
| 2.1 | Diferentes níveis de agregação dos modelos de simulação de tráfego | 14 |
| 2.2 | Comportamento dos veículos nos modelos <i>car-following</i> | 15 |
| 2.3 | AIMSUN versão 6.1.2 | 18 |
| 2.4 | TSIS-CORSIM versão 6.2. | 20 |
| 3.1 | Página do projeto OpenStreetMap. | 25 |
| 3.2 | Java OpenStreetMap Editor. | 26 |
| 3.3 | eWorld 0.9.1a. Edição de semáforos e eventos. | 27 |
| 3.4 | TrafficModeller versão 1.0. | 28 |
| 3.5 | Sistema multimodal | 29 |
| 3.6 | Fluxo dos dados e de execução dos programas | 33 |
| 4.1 | Software Livre vs Software Proprietário | 40 |
| 4.2 | Malha central da Cidade de Londrina-PR | 43 |
| 4.3 | Malha Central da Cidade de Londrina importada do OpenStreetMap | 45 |
| 4.4 | Dados originais importados no JOSM e resultado após o refino . . | 46 |
| 4.5 | eWorld 0.9.1a. Edição de semáforos e eventos | 47 |
| 4.6 | Tempos médios de viagem | 52 |
| 4.7 | Velocidade média de viagem | 52 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Cenários de avaliação | 47 |
| 4.2 | Fluxos de tráfego (veículos/período) | 48 |
| 4.3 | Probabilidades de conversão | 48 |
| 4.4 | Resultados dos cenários simulados | 52 |

1 Introdução

Característica quase que inerente à sociedade moderna, o tráfego rodoviário urbano assume papel de significativa importância, tanto no aspecto social quanto na atividade econômica. O sistema de tráfego urbano forma uma rede que conecta os indivíduos aos seus pontos de interesse, dando suporte tanto à necessidade humana básica de ir e vir quanto ao escoamento da produção e desenvolvimento de serviços e atividades sociais.

O crescimento do tráfego urbano inevitavelmente leva a situações de congestionamentos na maioria das grandes cidades do mundo. Como a demanda por deslocamentos cresce a uma taxa maior que a disponibilização de novas vias para absorvê-los, a situação tende a deteriorar-se gradativamente, a menos que novas e melhores estratégias de gerenciamento de tráfego sejam aplicadas.

Para analisar o desempenho e avaliar o impacto de políticas e estratégias de controle de tráfego é necessário modelar o comportamento do fluxo na infraestrutura viária. Diante da complexidade do sistema de tráfego, em particular o urbano, à medida que envolve inúmeras variáveis relacionadas tanto com a oferta quanto com a demanda viária, a técnica de simulação, entre as diversas técnicas utilizadas, tem-se constituído uma importante ferramenta para auxiliar no apontamento de soluções para os vários problemas do trânsito. Com a simulação, podem-se analisar vários cenários e antecipar os impactos positivos e negativos causados a partir da implantação de uma determinada alternativa (PORTUGAL, 2005).

A simulação, como ferramenta, permite a representação de malhas viárias complexas, levando em consideração as diferentes modalidades de transporte existentes. Dessa maneira, podem ser avaliados cenários que vislumbrem a utilização de meios de transporte alternativos, mudanças na geometria das vias e soluções temporárias ou alternativas, sem a necessidade de intervenções físicas ou levantamentos de dados em campo muito extensos, diminuindo consideravelmente os custos envolvidos no gerenciamento do tráfego.

Neste contexto, este trabalho oferece uma metodologia de integração entre soluções de software livre, soluções estas que permitem a formação de um ambiente de microssimulação para a avaliação de desempenho, segundo um critério, de diferentes cenários de tráfego. Serão apresentadas soluções em software livre, que além da realização das tarefas citadas, permitem também simular como os diferentes cenários e alternativas previstas se comportam em condições não típicas, como chuvas e nevoeiros, acidentes ou mesmo impedimentos ocasionais nas vias.

1.1 Motivação

Existem várias soluções e pacotes comerciais para microssimulação, porém estas soluções são fornecidas como *caixas pretas*, não permitindo a mudança ou adaptação dos modelos utilizados e, em algumas situações, nem os seus parâmetros. Uma solução para microssimulação em software livre provê vantagens que vão muito além da redução do custo de aquisição, uma vez que estas soluções dão ao usuário o direito não só de utilizar a solução sem custos, mas também de estudá-la e modificá-la sem quaisquer restrições.

1.1.1 Software Livre

Antes de entrar na questão específica do ambiente de microssimulação de tráfego urbano, objeto principal deste trabalho, cabe apresentar alguns dados relativos às características do software livre que nortearam a escolha desta modalidade para a seleção das diferentes soluções apresentadas no restante deste trabalho.

Primeiramente, é importante destacar a importância do que se chama *código* para o desenvolvimento de um software. O código é o conjunto de instruções, escritas em um determinada linguagem de programação, que instruem os computadores a realizarem as tarefas para as quais o software foi desenvolvido. Este código é chamado geralmente de *código fonte* porque nele estão as instruções na forma de uma linguagem de programação inteligível a um ser humano. Neste código fonte o programador desenha as instruções lógicas que permitem e instruem o computador sobre o quê e como ele deve executar as tarefas. O computador, entretanto, precisa que estas instruções lhe sejam passadas em uma linguagem que ele entenda, chamada comumente de *código de máquina*. O processo de tradução do código fonte, escrito em uma linguagem acessível a um ser humano, em código de máquina, o conjunto de instruções realmente interpretadas pelo computador, é chamado de compilação.

O acesso ao código fonte permite que sejam estudadas as instruções e como o software realiza as suas ações. Quando se tem acesso apenas ao código de máquina pode-se executar este software, mas a tarefa de entender profundamente o seu funcionamento se torna bastante difícil. Uma analogia explicativa permite visualizar melhor este conceito: o código fonte é como uma receita de bolo, a qual pode ser estudada e implementada diretamente várias vezes, gerando o produto final, o bolo. De posse da receita, podem ser feitas modificações de modo a atender paladares particulares ou situações diferenciadas, seja pela troca dos ingredientes como pela modificação dos passos necessários para a preparação da receita. Quando se tem acesso apenas ao bolo - neste analogia, o código de máquina - tem-se apenas o produto final. É muito difícil efetuar modificações e compreender os diferentes ingredientes e passos executados para a execução deste produto.

As soluções comerciais fornecidas sem o seu código fonte, no jargão técnico, são chamadas de soluções de *código fechado* ou *proprietárias*, uma vez que o acesso ao código fonte não faz parte do conjunto de informações providas na solução. Quando o código fonte é suprimido de um programa de computador, são suprimidos também dois importantes elementos: o conhecimento em torno da solução e a possibilidade de inovação à partir desta solução. A *FSF*¹, entidade criada em 1985 com o objetivo de fomentar o desenvolvimento de software que permitisse à sociedade o acesso ao conhecimento nele incorporado, elaborou a *GNU GPL*². Através da GNU GPL foram estabelecidos os quatro pilares básicos do software livre:

- A liberdade de executar o programa, para qualquer propósito
- A liberdade de estudar como o programa funciona, e de adaptá-lo às suas necessidades
- A liberdade de distribuir cópias, de modo que seja possível auxiliar outras pessoas
- A liberdade de aperfeiçoar o programa e distribuir estes aperfeiçoamentos ao público, de modo a beneficiar toda a sociedade

Do ponto de vista social, o software livre constrói um patrimônio comum de toda sociedade na forma de conhecimento. Este patrimônio comum permite, por exemplo, que o conhecimento seja assimilado de forma muito mais fácil pelos agentes sociais. com isso, a possibilidade de inovação torna-se acessível a todos e

¹<http://www.fsf.org>

²<http://www.gnu.org/licenses/gpl.html>

não apenas àqueles que controlam privadamente determinado rol de conhecimentos (FALCÃO et al., 2009).

Um estudo realizado em 2009 (GARCIA; BRESSAN; SILVA, 2010) elencou variáveis para a comparação entre soluções em software livre e proprietário de modo geral. A seguir são apresentadas as principais variáveis levantadas no estudo, relevantes à escolha das soluções objeto deste trabalho.

CLI

Custo derivado do direito de uso do software.

CPA

Refere-se ao custo para a obtenção do software ou de seu pleno fornecimento. Pode haver fornecimentos que encarecem o software livre, caso dos que incluem a documentação em papel e manuais detalhados de instalação e administração do sistema, mas que praticamente cobrem custos e, mesmo assim, tornam-se menos dispendiosos que o software proprietário.

CAT

Reporta-se ao custo para a obtenção de novas versões e inovações. As atualizações do software livre normalmente são adquiridas da mesma forma de sua aquisição e podem ser distribuídas livremente, tornando-se assim menos onerosas que a do software proprietário.

CSM

São os custos decorrentes do suporte técnico, manutenção e operação do sistema. Como existe menor difusão do software livre, o mercado não apresenta boa oferta de técnicos para tal sistema, tornando-se mais onerosos pela própria lei da oferta e demanda. De outro lado, o custo de manutenção do software livre seria menor do que o do software proprietário devido a uma qualidade mais durável do software livre.

CCO

Denomina-se customização a liberdade que o usuário possui para modificar o software para atender às suas necessidades. Neste item consideram-se os custos decorrentes desta atividade. O software proprietário possui limitações legais de customização, pois esta é feita em casos especiais e seu custo é elevado ao contrário do software livre que por ter seu código fonte aberto, pode ser modificado, aprimorado e reparado sem limitações legais.

RCF

Significa a agilidade na correção das eventuais falhas, sejam elas oriundas

de defeitos no projeto do software, erros de programação ou questões relacionadas à segurança. Os desenvolvedores de software livre produzem pequenos reparos que são disponibilizados publicamente através de lista de web sites, possibilitando aos usuários dos softwares afetados facilidade na comunicação. Quanto ao software proprietário, por possuir seu código fonte fechado, somente um indivíduo ou um grupo especializado de uma empresa contratada tem o controle sobre seu código e suas funções, melhoramentos e correções o que pode acarretar demora na resposta aos problemas, pois tendem a esperar um acúmulo de pedidos a fim de criar um pacote de serviços com todas as soluções. A inteligência coletiva empregada na rede mundial de computadores permite que haja maior velocidade na correção das falhas do software livre que no software proprietário.

QTD

É o conjunto de características que o software deve possuir e que atenda às necessidades dos usuários. de revisão e correção. Pelo desenvolvimento do software livre estar vinculado a diversos indivíduos conectados ou on-line, agiliza-se o processo de revisão, correção e implementação do software, gerando-se maior qualidade se comparado ao software proprietário. A qualidade técnica do software livre é diretamente ligada à este modo de produção, com grande número de desenvolvedores voluntários via internet. Esta qualidade atrai novos usuários que podem aperfeiçoar o software, criando um círculo virtuoso, adicionando cada vez mais qualidade ao produto.

SOC

Significa compartilhamento de conhecimento quando da participação dos indivíduos no processo de conhecimento e desenvolvimento do software livre. O software livre proporciona a participação dos indivíduos no processo de conhecimento e desenvolvimento do software e não só na sua simples utilização.

DRF

Significa a dependência em relação a um único fornecedor para o usuário de um software. O usuário do software proprietário é dependente de um único fornecedor, e, portanto fica a mercê de mudanças como: descontinuidade do produto ou dependência para atualizações e insumos. Como não existe uma empresa que detenha os direitos de propriedade do software livre, muitos outros fornecedores podem ser acionados. O software livre sintetiza as quatro liberdades básicas (estudo, alteração, distribuição e cópia), as quais

geram independência em relação a um fornecedor único, deixando o usuário escolher livremente o seu provedor para soluções, já que seu código estará disponível para a comunidade, ou seja, não há uma única entidade sobre a qual o futuro do software livre dependa.

CUS

Customização é a liberdade que o usuário possui para modificar o software para suas necessidades. Devido à existência do código fonte aberto, o software livre pode ser modificado, customizado, aprimorado e reparado pelos usuários a fim de satisfazer suas necessidades. No software livre, a grande maioria de seus aplicativos pode ser configurada de maneira distinta e, após sua distribuição, novas opções podem ser adicionadas e redistribuídas.

OBS

Consiste na compatibilidade de uso do software mesmo em hardware desatualizado. Máquinas que seriam consideradas obsoletas pelos usuários de software proprietário são usadas por usuários de software livre, pois este tipo de software pode ser customizado para um hardware considerado velho.

ESS

A estabilidade e a confiabilidade significam segurança do software em sua operação, qualidade, implementação e correção de falhas. A estabilidade e a segurança são vantagens do software livre frente ao software proprietário, pois sua maior confiabilidade em relação ao software proprietário está em seu processo de desenvolvimento, que é coletivo. O ritmo comercial e uso massificado do software proprietário o expõem a freqüentes problemas operacionais.

CIU

Refere-se à interação entre hardware, software e usuário. As ferramentas de formatação do software livre não são plenamente padronizadas, ou seja, a interface com o usuário muda a cada versão ou em cada distribuição. Esse problema é fruto do desenvolvimento descentralizado. Já no software proprietário, que por possuir um desenvolvimento centralizado, adquire um estilo de formatação uniforme para a interface do usuário.

FIC

Consiste no trabalho para instalar e configurar o software para uso. A variedade de programas similares pode confundir o usuário de software livre; por serem mais complexos, o usuário, por vezes, fica sem saber qual o melhor

para sua real necessidade. Já o usuário do software proprietário não oferece tanta indecisão, pois seus programas são menos complexos, mais conhecidos e possui menor variedade.

Analisando as características descritas acima, o estudo sintetiza as vantagens e desvantagens do software livre em relação ao software proprietário. O resultado é resumido no quadro exposto na figura 1.1.

| VARIÁVEL | | VANTAGEM |
|---|---|-----------------------|
| Custo Total | CLI - Custo de Licença | Software Livre |
| | CPA - Custo de Aquisição | Software Livre |
| | CAT - Custo de Atualização | Software Livre |
| | CSM - Custo de Suporte, Manutenção e Operação | Sem Consenso |
| | CCO - Custo de Customização | Software Livre |
| RCF - Rapidez na Correção de Falhas | | Software Livre |
| QTD - Qualidade Técnica do Sistema/Desempenho | | Software Livre |
| SOC - Socialização do Conhecimento | | Software Livre |
| DRF - Dependência em Relação a Fornecedores | | Software Livre |
| CUS - Customização | | Software Livre |
| ESS - Estabilidade e Segurança | | Software Livre |
| ATM - Assistência Técnica e Manutenção | | Sem Consenso |
| CIU - Consistência da Interface do Usuário | | Software Proprietário |
| FIC - Facilidade de Instalação | | Sem Consenso |

Figura 1.1: Software Livre vs Software Proprietário. Adaptado de (GARCIA; BRESSAN; SILVA, 2010)

1.2 Proposta

Tem-se como proposta deste trabalho a identificação e organização de ferramentas desenvolvidas em software livre e a elaboração de uma metodologia para a utilização destas ferramentas em sistemas de otimização e planejamento da operação de malhas viárias.

Tome-se como exemplo a cidade de Londrina, Paraná, onde os setores de gerenciamento da malha viária estão aplicando uma série de alterações como a retirada de faixas de estacionamento, criação de corredores exclusivos para transporte público coletivo, além de alterações dos tempos semafóricos. Na maioria dos casos, estas alterações são feitas com base em dados empíricos e observações calcadas em tentativa e erro. Um dos principais fatores que levam à utilização desta metodologia é a falta de ferramentas para o planejamento e avaliação das

propostas de alterações, seja pela questão custo, pela falta de informação sobre a disponibilidade de alternativas ou a necessidade de implantação de medidas em caráter de urgência.

Analisando as variáveis expostas na figura 1.1 e trazendo a análise para a escolha de uma solução de microssimulação de tráfego urbano, o custo não necessariamente impossibilitaria a aquisição de um software proprietário pelos setores de gerenciamento da malha viária, uma vez que os ganhos em otimização e organização da malha superariam em muito os investimentos iniciais. Os reais empecilhos para a aquisição e utilização do software proprietário recaem principalmente nas variáveis *CCO* e *CUS*, uma vez que a maioria das soluções comerciais são desenvolvidas e aplicadas no exterior, onde as características, tanto viárias quanto de comportamento dos motoristas, são diferentes das realidades locais brasileiras.

A utilização de soluções em software livre permite que os setores de gerenciamento da malha viária possam simular e verificar o desempenho da malha viária antes e depois das alterações propostas, com todas as vantagens proporcionadas pelo uso de software livre, sendo as principais a minimização do fator custo total e, principalmente, a possibilidade de alteração e adequação da solução à realidade local.

Dentre as soluções em software livre estudadas, a que melhor atende à proposta deste trabalho é o projeto **SUMO**, desenvolvido pelo *Institute of Transportation Research* do *German Aerospace Centre* (KRAJZEWICZ et al., 2002a). O SUMO é formado por um conjunto modular de programas em software livre, sendo que cada módulo é independente dos outros. Isto permite a adequação de cada módulo sem a interferência direta no funcionamento dos demais. Esta abordagem modular permite, também, o desenvolvimento de outras soluções externas que venham a complementar e facilitar o uso do microssimulador nos diferentes cenários a serem avaliados.

1.3 Organização

São apresentados no capítulo 2 alguns conceitos básicos necessários para compreensão do problema estudado e da solução proposta. Ainda no capítulo capítulo 2 é feita a descrição de alguns dos sistemas de simulação comerciais existentes, escolhidos pelo maior número de ocorrências na literatura e cujas características e funcionalidades nortearam a escolha de soluções equivalentes em software livre. As etapas para o processo de simulação proposto, bem como as ferramentas em

software livre e o microssimulador escolhidos, incluindo o seu mecanismo e forma de utilização são apresentados no capítulo capítulo 3. No capítulo 4 é apresentada a metodologia e ferramentas descritas no capítulo 3 aplicadas ao estudo de caso da implantação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina. No capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho, as contribuições que o trabalho gerou para a comunidade de software livre e sugestões de trabalhos futuros.

2 Modelagem e Simulação de Tráfego

2.1 Simulação de Tráfego

Simulação é o processo de modelar um sistema real e conduzir experimentos através deste modelo com o propósito de compreender o comportamento do sistema modelado e avaliar estratégias para a sua operação (SHANNON, 1975). Conceitualmente, um modelo é uma aproximação ou idealização de aspectos selecionados da estrutura, comportamento ou outra característica de um processo ou sistema do mundo real (OWEN et al., 1996).

O uso da simulação é uma alternativa viável e bastante popular para a análise de problemas dinâmicos que são extremamente difíceis ou complexos para serem resolvidos ou avaliados de outras maneiras. Estes problemas são normalmente associados a processos complexos e interligados que não podem ser descritos diretamente de maneira analítica. Normalmente estes processos são caracterizados pela interação de vários componentes ou entidades. O comportamento destas entidades individuais e a sua interação com um número reduzido de outras entidades pode ser analisado individualmente, compreendido e representado de maneira lógica e matemática, porém, interações mais complexas e simultâneas de diversas destas entidades, além das variáveis específicas dos diferentes componentes do sistema não podem, genericamente falando, serem descritas completamente de maneira lógica ou matemática.

Os modelos de simulação são desenhados para imitar o comportamento de tais sistemas, de modo a integrar os comportamentos individuais das entidades participantes e suas interações de modo a produzir uma descrição detalhada e quantitativa do desempenho do sistema como um todo. Especificamente, modelos de simulação são representações lógicas e/ou matemáticas de sistemas do mundo real, tomando a forma de programas executados em um ambiente computacional para experimentação (LIEBERMAN; RATHI, 1999).

Os sistemas de simulação de tráfego, especificam um *cenário* (formado, por exemplo, pela configuração da malha viária, demanda de tráfego, características de movimentação dos veículos, etc.) como parâmetros de entrada do modelo, sendo que o resultado da simulação usando este modelo descreve, então, a operação do sistema de duas maneiras: estatística e gráfica. Os resultados numéricos provêm base para análise com uma descrição quantitativa detalhada *do que* provavelmente acontecerá. A representação gráfica provê, para o pessoal capacitado, uma visão *do porquê* o sistema está se comportando desta maneira. É preciso salientar, porém, que é responsabilidade do avaliador do resultado da simulação a interpretação da qualidade da informação provida pelo modelo de modo a entender as relações de causa e consequência (OWEN et al., 1996).

O estudo científico sobre fluxos de tráfego começou na década de 1930, com a aplicação da teoria das probabilidades para a descrição de tráfego viário (ADAMS, 1936), e o aprofundamento dos estudos aplicando modelos matemáticos relacionando velocidade e volume (GREENSHIELDS, 1935). Após a segunda guerra mundial, com a grande expansão do sistema viário mundial e o *boom* da indústria automotiva, novas pesquisas sobre o tráfego foram realizadas, incluindo a aplicação de teorias e os fundamentos do que viriam a ser os modelos *car-following*, descritos posteriormente neste trabalho. Atualmente, o campo de pesquisa relacionado a modelos de simulação é vasto, (BOXILL; YU, 2000) apresenta uma revisão bibliográfica abordando 84 modelos de tráfego distintos.

O caso da avaliação e otimização do tráfego urbano é um exemplo clássico de uso apropriado de ambientes de simulação, visto que abordagens analíticas sobre o tema podem não ser satisfatoriamente apropriadas para avaliar o problema. Os modelos de simulação apresentam como vantagens potenciais (MAY, 1990):

- Avaliar situações novas, inexistentes.
- Avaliar a importância relativa das variáveis do processo, bem como o seu relacionamento.
- Avaliar políticas antes de implementá-las, ao invés da tentativa-e-erro.
- Produção de informação com seqüência temporal e espacial.
- Permitir o estudo do sistema em tempo real, com alterações na escala de tempo.
- Avaliar experimentos sem oferecer risco aos usuários.

- Quantificar os padrões referenciais de modo a permitir a comparação de diferentes cenários.
- Avaliar os efeitos decorrentes de mudanças sutis na operação do sistema.

O autor alerta, também, sobre as restrições e limitações da modelagem através de simulação:

- Verificar se não existem alternativas mais fáceis para a resolução do problema.
- As simulações podem consumir tempo e dinheiro.
- Para uma simulação eficiente é necessário um volume de dados significativo. Estes dados podem vir de fontes de difícil acesso.
- Caso a validação e a calibração dos modelos não forem corretas e confiáveis, todo o modelo se torna inútil.
- A simulação só é plenamente aproveitada quando o sistema avaliado é profundamente compreendido.
- O uso de modelos de terceiros exige o acesso à documentação detalhada e clara sobre a sua utilização.
- Todo modelo possui limitações e hipóteses, que devem ser consideradas na análise dos resultados.

2.2 Modelando fluxos de tráfego

A modelagem dos fluxos de tráfego permite a aplicação de uma grande variedade de modelos, por duas razões principais. Primeiro, os detalhes dos fluxos de tráfego podem ser resolvidos em diferentes dimensões, partindo desde a dinâmica das médias quantitativas até os movimentos individuais dos veículos. Segundo, não há princípios básicos conhecidos para o fluxo de tráfego, sendo assim, modelos com diferentes aproximações podem ser utilizados, desta forma, o campo de fluxo de tráfego permite que uma quantidade substancial de idéias sejam apresentadas (KRAUSS, 1998).

A classificação dos modelos de tráfego pode ser feita, principalmente, de acordo com o nível de agregação que são tratados os elementos do sistema (LIEBERMAN; RATHI, 1999). A grande maioria dos modelos de simulação de tráfego

descrevem sistemas *dinâmicos*, onde o *tempo* é sempre a variável básica independente. Modelos de simulação de *tempo contínuo* descrevem como os elementos de um sistema têm o seu estado alterado continuamente ao longo do tempo em resposta aos estímulos apresentados pelos outros elementos. Modelos de simulação *discretos* representam sistemas do mundo real (que podem ser contínuos ou discretos) afirmando que seus estados mudam abruptamente em determinados instantes do tempo.

É apresentada a seguir uma descrição mais detalhada da classificação por nível de agregação.

2.3 Classificação dos modelos de tráfego por nível de agregação

A classificação dos modelos, no tocante ao seu nível de agregação, divide os modelos em microscópicos, que trabalham descrevendo a dinâmica individual dos veículos, e os modelos macroscópicos, que são baseados em equações trabalhando sobre quantidades médias, tais como densidade e médias de fluxo de veículos. Podemos classificar alguns modelos microscópicos como sub-microscópicos (ou nanoscópicos). Neste caso há a consideração dos veículos como entidades individuais também, porém com um nível de detalhamento ainda maior, considerando, por exemplo, informações como a rotação do motor e o combustível utilizado. Isto permite a apuração de informações mais detalhadas, tais como taxas de emissão e poluentes produzidas. Há ainda uma terceira classe de modelos, definida como modelos mesoscópicos, que descrevem os veículos usando uma mistura de dinâmicas micro e macroscópicas (NETO, 2009). Nestes modelos, a dinâmica individual dos veículos é governada pelas quantidades do grupo, tal como a densidade média dos veículos na região onde o veículo está se movimentando, deste modo cada veículo se movimenta no campo médio criado por todos os outros veículos da região. Na figura 2.1 podemos visualizar os diferentes níveis de resolução.

Dado o escopo deste trabalho, serão apresentados e avaliados apenas os modelos microscópicos, macroscópicos e mesoscópicos.

2.3.1 Modelos microscópicos

São modelos caracterizados pelo alto nível de detalhamento. Tanto os veículos quanto as demais entidades do sistema podem ser representados de forma indi-

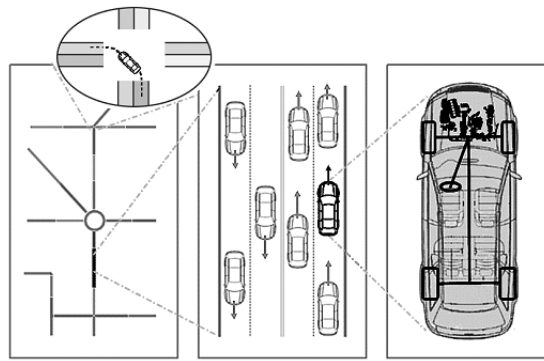


Figura 2.1: Diferentes níveis de agregação dos modelos de simulação de tráfego (da esquerda para a direita: macroscópica, microscópica, sub-microscópica; no detalhe: mesoscópica).

Fonte (KRAJZEWICZ et al., 2002b).

vidualizada. A movimentação dos veículos se dá tanto longitudinalmente quanto transversalmente ao longo dos trechos (NETO, 2009). Nestes modelos, o sistema é tratado com um alto nível de desagregação, onde cada elemento do sistema corresponde a uma entidade com características individuais.

A idéia principal por trás da modelagem microscópica de fluxos de tráfego é a descrição das dinâmicas de cada veículo individual em função das posições e velocidades dos veículos vizinhos. Em geral, dois processos de dinâmica devem ser levados em consideração: o *car following*¹ e *lane-changing*².

2.3.1.1 Modelos *Car-following*

A descrição da teoria por trás dos modelos *car-following* começa por assumirmos que uma mudança na velocidade de um veículo só acontece se a sua velocidade momentânea não coincide com uma velocidade desejada V_{des} , que é limitada por considerações de segurança, limites legais, mecânicos e etc (KRAUSS, 1998). Estes modelos descrevem o comportamento de um veículo viajando com uma velocidade igual ou inferior a sua velocidade desejada, onde cada veículo (*veículo seguidor*) segue outro imediatamente à sua frente (*veículo líder*), na mesma faixa, sem ultrapassá-lo.

Na figura 2.2 podemos ver uma representação gráfica do comportamento dos veículos conforme o espaçamento para o veículo líder. A situação A ilustra um

¹A literatura que aborda o tema comumente usa a terminologia em inglês *car-following*, sendo assim, o termo original foi utilizado neste trabalho ao invés de sua tradução direta *veículo-seguidor*

²A literatura que aborda o tema comumente usa a terminologia em inglês *lane-changing*, sendo assim, o termo original foi utilizado neste trabalho ao invés de sua tradução direta *mudança de faixa*.

espaçamento típico e seguro entre seguidor e líder. Como o veículo seguidor está dentro de uma faixa de tolerância (calculada em função da sua velocidade momentânea), não há a necessidade de desaceleração e o veículo seguidor pode continuar buscando alcançar V_{des} . Na situação B, o veículo seguidor atinge o espaçamento mínimo do veículo líder e inicia um processo de desaceleração. A aceleração do veículo seguidor é retomada quando este se encontra novamente dentro da faixa de tolerância, a uma distância segura do veículo líder, propícia à retomada da aceleração, conforme demonstrado na situação C.

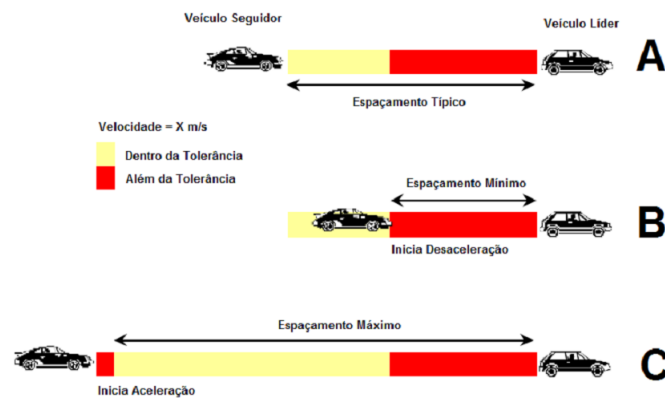


Figura 2.2: Comportamento dos veículos nos modelos *car-following*.
 Fonte (NETO, 2009).

2.3.1.2 Modelos *Lane-changing* e *Gap-acceptance*

Quando um veículo tem a intenção de mudar de faixa, ele precisa conhecer a velocidade e a localização dos veículos vizinhos (LIU, 1994). A necessidade da mudança de faixa ocorre, geralmente, quando um veículo está prestes a fazer uma conversão em uma interseção ou quando o veículo imediatamente à sua frente está trafegando a uma velocidade inferior a sua velocidade desejada. Para que a mudança de faixa aconteça de maneira segura, são aplicadas regras de *gap-acceptance*³ (NETO, 2009), onde são modeladas as probabilidades de o veículo encontrar um *gap* (brecha), em algum instante de tempo, que permita a sua entrada no fluxo da via desejada. O valor ou tamanho deste *gap* pode decrescer com aumento do tempo de espera.

As pesquisas que versam exclusivamente sobre os modelos *lane-changing* são muito menos citadas na literatura que os modelos *car-following*, sendo, na maioria das vezes, trabalhadas como características destes modelos (KRAUSS, 1998).

³A literatura que aborda o tema comumente usa a terminologia em inglês *gap-acceptance*, sendo assim, o termo original foi utilizado neste trabalho ao invés de sua tradução direta *aceitação de brechas*.

Uma análise parcialmente empírica, parcialmente teórica sobre as mudanças de faixa em rodovias de duas faixas foi realizado por (SPARMANN, 1978), enquanto (LEUTZBACH; BUSCH, 1984) realizou este mesmo tipo de análise em rodovias de três faixas. Um modelo para a estrutura de decisões de mudança de faixa em situações de tráfego urbano, onde os semáforos, obstruções e alta densidade de veículos exercem uma maior influência, foi desenvolvido por (GIPPS, 1986).

2.3.2 Modelos macroscópicos

Os modelos macroscópicos são usados comumente na análise de *freeways* e vias arteriais principalmente pelo fato de que as relações atraso-fluxo são melhor aplicadas para explicar tempos de viagem ao longo de arcos longos. A avaliação do tráfego é feita seção a seção, ou trecho a trecho, sendo assim, a sua aplicação e manutenção são mais rápidas e acessíveis em relação aos modelos microscópicos. Esta característica da avaliação faz com que o custo computacional da sua aplicação seja relativamente baixo, porém torna os modelos menos flexíveis e pouco detalhistas (NETO, 2009).

Nos modelos macroscópicos, o tráfego é tratado com baixo nível de detalhamento, sendo representado como uma entidade única, desprezando a individualidade dos veículos, e o seu uso é mais indicado quando (PORTUGAL, 2005):

- É dispensável a avaliação das interações veículo a veículo.
- A extensão da rede a ser simulada inviabiliza o uso de modelos microscópicos devido ao alto custo computacional e complexidade de modelagem necessária.
- Existem restrições de tempo e recursos para o desenvolvimento da modelagem.

2.3.3 Modelos mesoscópicos

Os modelos mesoscópicos situam-se no intervalo entre a modelagem microscópica e a modelagem macroscópica. Eles permitem algum nível de desagregação, em geral na representação das entidades ou das interações entre elas. Como esta desagregação pode acontecer em diferentes níveis, a diversidade de abordagens mesoscópicas é ampla. Manobras de mudança de faixa podem ser representadas para cada veículo individualmente, mas a decisão sobre a manobra é baseada em densidades da faixa, e não nas relações individuais entre os veículos (LIEBERMAN;

RATHI, 1999). Modelos como o TRANSYT (ROBERTSON, 1968), desagregam a corrente de tráfego, no tempo e no espaço, na forma de perfis de fluxo cíclicos (ROBERTSON, 1974).

Estes modelos simulam o fluxo de tráfego em específicos passos de tempo, e são sempre determinísticos. Para cada passo de tempo, o modelo estima o fluxo de tráfego entrando em uma via, viajando a jusante, parando devido à luz vermelha, e movimentando novamente quando a luz se torna verde. Alguns desses modelos também contam com a dispersão de pelotão, como os veículos viajam de um ponto a outro a jusante no espaço.

Os modelos mesoscópicos podem ser classificados como baseados em via ou baseados em tempo. O modelo baseado em via simula o fluxo de tráfego em uma via em um tempo para todos os passos de um ciclo. Este modelo trata a fila de veículos no sinal como uma pilha ascendente. Como resultado, todos os veículos chegando durante o vermelho vão até a linha de parada e se juntam à fila vertical. O modelo baseado em via pode permitir mais veículos na pilha da fila do que a capacidade de armazenamento da via. Então, este modelo não é adequado para condições de congestionamento ou para vias curtas onde o tempo sub-ótimo pode causar filas desde o sinal anterior. O modelo baseado em tempo, por outro lado, simula o fluxo de tráfego em todas as vias para cada passo de tempo. Além disso, a precisão desse modelo pode depender do número de ciclos simulados (CERVANTES et al., 2009).

2.4 Sistemas Comerciais de Simulação de Tráfego Urbano

Existem vários simuladores e soluções comerciais disponíveis no mercado, com características específicas e modelagens independentes. (PORTUGAL, 2005) apresenta um estudo comparativo entre alguns destes simuladores disponíveis, elencando suas características principais e suas aplicações. (BOXILL; YU, 2000) apresenta um estudo aprofundado de várias soluções com o objetivo de avaliar a resposta de cada um destes sistemas no contexto de um ambiente de *Intelligent Transportation Systems (ITS)*⁴. A seguir são listados alguns dos simuladores comerciais e ferramentas mais citadas na bibliografia pesquisada, sendo que as suas

⁴Na década de 1980, um grupo de profissionais da área de transportes reconheceu o impacto que a revolução da computação e das tecnologias de comunicação da Era da Informação poderiam ter na área de transportes. Comissionado pelo *Transportation Research Board* (<http://www.trb.org>), as idéias de aplicação destas novas tecnologias foram agrupadas no conceito de *Intelligent Transportation Systems - ITS* (WEILAND; PURSER, 2000)

características e funcionalidades foram os parâmetros principais para a escolha de uma solução em software livre equivalente.

2.4.1 AIMSUN - *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks*

O AIMSUN (FERRER; BARCELÓ, 1993) foi desenvolvido por J. Barceló e J. L. Ferrer na Universidade Politécnica da Catalunha em Barcelona. É uma ferramenta de software capaz de reproduzir condições de tráfego real em uma rede urbana que pode conter também vias arteriais e vias expressas.

O comportamento individual de cada veículo é modelado continuamente durante todo o período da simulação, seguindo diversos modelos comportamentais (*car-following*, *lane-changing*, *gap-acceptance*). O AIMSUN provê uma saída bem detalhada: fluxos, velocidades, duração de jornadas, etc. que podem ser visualizadas de maneira textual ou através de gráficos. Devido à modelagem detalhada de cada veículo na rede, o AIMSUN pode simular praticamente todo tipo de detector de tráfego: contagens, ocupação e velocidade. Ele ainda pode fazer distinções relativas à diferentes tipos de veículos e motoristas, pode lidar com uma gama extensa de geometrias na malha viária e ainda modelar incidentes e manobras conflitantes.

Recentemente o AIMSUN foi ligado ao sistema SCOOT UTC (THOMAS; HOWARD; BAFFOUR, 2006), passando os detalhes do fluxo de tráfego ao SCOOT e utilizando a informação retornada pela análise como *feedback* para a simulação.

O AIMSUN começou como um produto de pesquisa, mas se transformou em um produto comercial. O AIMSUN é um pacote de software desenvolvido apenas para o sistema operacional Microsoft Windows®. A figura 2.3 mostra a aparência da sua interface na versão atual, a 6.1.2, lançada em junho de 2010.

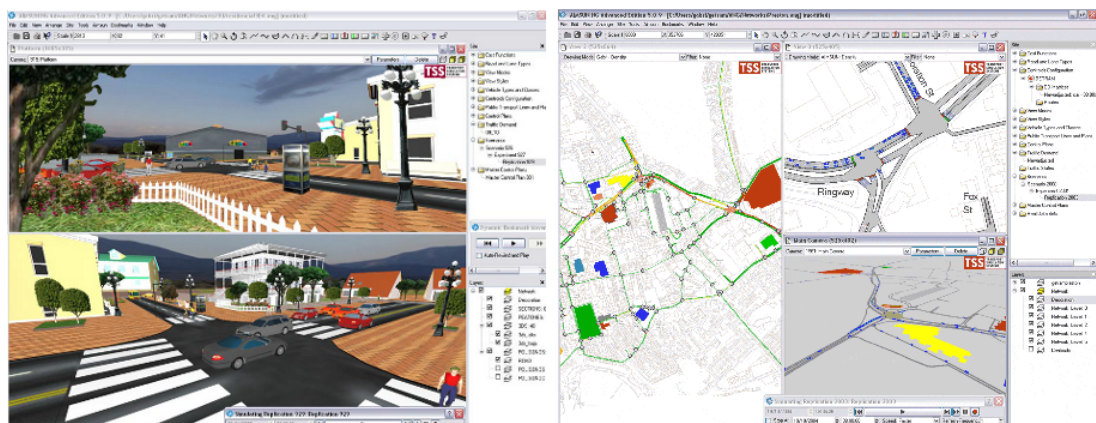


Figura 2.3: AIMSUN versão 6.1.2. Fonte (AIMSUN, 2010)

2.4.2 DRACULA - *Dynamic Route Assignment Combining User Learning and Microsimulation*

O microssimulador de tráfego DRACULA faz parte de um modelo mais amplo, com outras funções. A proposta original do DRACULA é compor uma nova geração de modelos urbanos de transportes, em relação às abordagens tradicionais baseadas em equilíbrio.

A escolha de rotas baseada no equilíbrio pressupõe uma boa experiência dos usuários sobre a rede, que somente é estabelecida em longo prazo. O objetivo do DRACULA é representar a evolução do tráfego em redes urbanas, avaliando os efeitos entre o estado da rede e a demanda, considerando a variabilidade dentro do dia e dia-a-dia. O modelo avalia o comportamento particular de cada indivíduo.

Em (TIMMS; WATLING; LIU, 1997) encontra-se modelo completo como um *supermodelo* à medida que é composto por três sub-modelos independentes: o modelo de escolhas, o modelo de aprendizado, e o micro-simulador de tráfego. Os modelos de aprendizado e escolhas compõem a modelagem de demanda, que avalia o comportamento de uma população de potenciais viajantes, numa base dia-a-dia.

O modelo de escolhas define para cada potencial viajante, a partir da sua experiência passada e da sua percepção atual sobre a rede que ele efetivamente viaja, a rota a ser adotada e o instante de partida. Essas informações são passadas para o microssimulador de tráfego, que reproduz a trajetória de cada indivíduo através da rede, estimando tempos e custos de viagem nos arcos. Ao final do dia, o modelo de aprendizado armazena num arquivo histórico de cada indivíduo, os tempos e os custos de viagem experimentados. O arquivo histórico influenciará as escolhas nos próximos dias (LIU, 1994).

O DRACULA faz parte de um pacote de software desenvolvido apenas para o sistema operacional Microsoft Windows®.

2.4.3 CORSIM - *Corridor Simulation*

O CORSIM foi desenvolvido pela *Federal Highway Administration* e é, atualmente, parte do pacote TSIS (Traffic Software Integrated System) distribuído pelo McTrans Center, da Universidade da Flórida.

O CORSIM é um modelo de simulação de tráfego microscópico estocástico que pode modelar interseções com prioridade e com controle semafórico fixo ou

atuado. Permite a modelagem de tipos de veículos distintos, operação de ônibus em faixa única ou compartilhando o fluxo comum, pontos de parada com ou sem baia e tempos de embarque e desembarque. Modela estacionamento nos trechos e fontes que geram ou atraem tráfego.

O comportamento do motorista com relação ao avanço no amarelo do semáforo, bloqueio parcial da via, operações de carga e descarga e interferência dos pedestres nas interseções podem ser adicionado como entrada no modelo de simulação.

Como saída da simulação, podem ser analisados dados como: a velocidade, número de paradas, filas, atrasos, relação de veículos por hora de viagem, relação de veículos por quilômetro de viagem, consumo de combustível, emissão de poluentes, entre outros.

A versão 6.2 do TSIS integra o CORSIM e o TRANSYT-7F em uma mesma distribuição. O TSIS é um pacote de software desenvolvido apenas para o sistema operacional Microsoft Windows®. A figura 2.4 mostra a aparência da sua interface na versão atual, a 6.2, lançada em fevereiro de 2010.

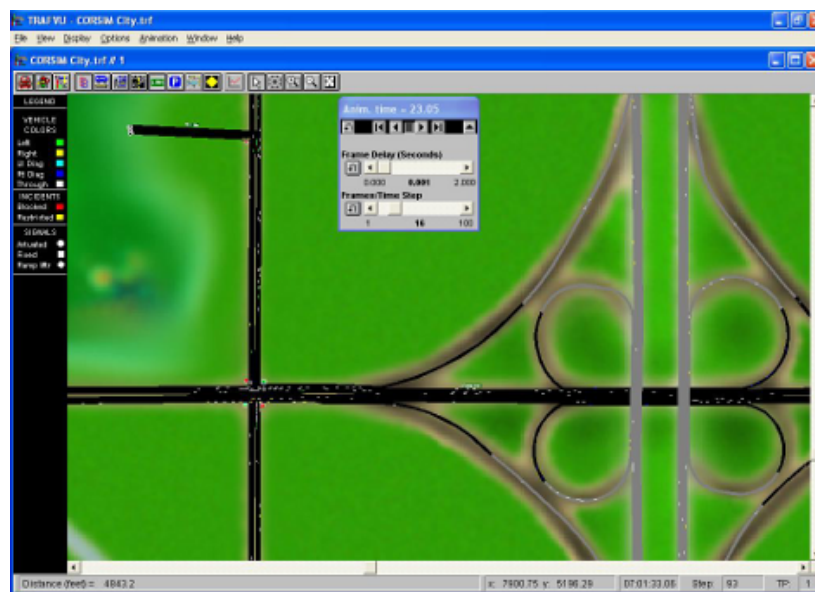


Figura 2.4: TSIS-CORSIM versão 6.2. Fonte (TSIS-CORSIM, 2010)

2.4.4 INTEGRATION - *Dynamic Traffic Assignment and Simulation Software*

O simulador INTEGRATION foi desenvolvido inicialmente entre os anos de 1984 e 1986 por Michael Van Aerde, como resultado de sua dissertação na Universidade de Waterloo no Canadá.

O nome do simulador vem da capacidade de seu modelo integrar a atribuição

de tráfego e a simulação microscópica, unindo em uma mesma lógica a modelagem de rodovias e vias urbanas (AERDE et al., 1996).

O INTEGRATION é caracterizado como um modelo microscópico de simulação de tráfego porque modela individualmente a velocidade, a aceleração, a movimentação lateral e a movimentação longitudinal dos veículos ao longo de suas rotas, em intervalos de décimos de segundo. A busca de um modelo que lidasse com problemas integrados de controle foi inspirada nos artigos de Robertson do início da década de 1980, e influenciada pelos principais modelos de simulação de tráfego da época, como o TRANSYT (AERDE et al., 1996).

O INTEGRATION é capaz de modelar a dispersão microscópica do pe- lotão utilizando um processo similar ao processo macroscópico do TRANSYT, e também realiza a coordenação entre semáforos baseado nos *CFPs* (*Cyclic Flow Profiles* - padrões cíclicos de tráfego - minimizando a cada ciclo a combinação entre atraso e paradas através de um índice de performance, semelhante ao TRANSYT (DUTRA, 2005).

O INTEGRATION é um pacote de software desenvolvido apenas para o sistema operacional Microsoft Windows[®] e a última versão disponível é a 2.30.

3 Microssimulação de Tráfego Usando Software Livre

O sucesso da modelagem de tráfego aplicada à avaliação de políticas de operação e planejamento baseia-se, principalmente, na comparação de cenários. Tem-se o desempenho de um cenário de referência, representando a realidade, e as novas propostas são avaliadas comparando os resultados com este cenário de referência. A implantação de modelos de tráfego segue uma metodologia genérica basicamente consensual na literatura pesquisada. Para a elaboração da solução proposta, foi utilizada uma compilação das etapas apresentadas por (LIEBERMAN; RATHI, 1999) e (PORTUGAL, 2005), sendo que o foco principal foi o da escolha de soluções em software livre que atendam todas as especificações das diferentes etapas e sejam passíveis de integração, com a conseqüente formação de uma solução final única e coesa.

- Definição dos cenários
- Levantamento e codificação dos dados
- Simulação dos cenários avaliados
- Calibração e validação do modelo
- Documentação e análise dos resultados

3.1 Construção de ambientes de simulação de tráfego

O processo de desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego, apesar de ser passível de ser dividido em etapas, não é um processo de um único passo, ou seja, apesar de a metodologia ser apresentada de uma maneira seqüencial, cada uma das etapas pode e deve ser reavaliada ciclicamente até que a modelagem atinja níveis de confiança satisfatórios. A descrição das etapas, uma breve

discussão sobre as suas características e as ferramentas avaliadas para a sua implementação são apresentadas nas próximas seções.

3.1.1 Definição dos cenários

Nesta etapa são definidas as hipóteses básicas a serem adotadas para o sistema. Para tal implementação é necessária a definição e o conhecimento do ambiente a ser modelado, o propósito da modelagem e os elementos a serem considerados para a análise.

A concepção envolve a avaliação do problema e dos elementos representados no modelo: a delimitação da área a ser estudada, a definição dos períodos a serem analisados e a seleção das vias representadas. Para a definição dos elementos representados é necessário verificar principalmente o impacto destes elementos no desempenho do tráfego ou nos parâmetros de análise.

3.1.2 Levantamento e codificação dos dados

Na etapa de levantamento e codificação dos dados são caracterizados os ambientes estudados, com a coleta das informações necessárias à codificação e posterior calibração e validação do modelo. As fontes destes dados envolvem desde observações de campo, levantamento de dados e mapas e a programação operacional implementada pelos órgãos responsáveis. Quando há limitações nas coletas de informação em campo, sejam elas por questões de viabilidade ou custo, (LIEBERMAN; RATHI, 1999) sugere aceitar os valores referenciais relacionados na bibliografia ou os valores *default* dos parâmetros dos modelos, sendo que esta situação deve ser levada em conta na fase de análise e documentação dos resultados obtidos.

Em termos gerais, tanto (PORTUGAL, 2005) quanto (LIEBERMAN; RATHI, 1999) definem que os dados podem ser agrupados em dois conjuntos principais: os dados da rede viária e os dados da demanda. Os dados da rede descrevem a caracterização geométrica, espacial e operacional da rede viária, na forma de, via de regra, arcos (trechos entre as interseções) e nós (as interseções propriamente ditas). Em (LIND et al.,) podemos encontrar exemplos de dados de arco exigidos pela maioria dos modelos microscópicos: comprimento, número de faixas, largura das faixas, faixas exclusivas, pontos de parada, velocidade limite, etc. Os autores ainda citam como exemplos de dados dos nós: conversões permitidas, programação semaforica, relações de prioridade, áreas para a proibição de bloqueio

das interseções, etc.

Na seqüência são apresentadas as ferramentas em software livre propostas para o atendimento das necessidades desta etapa.

3.1.2.1 OpenStreetMap

O OpenStreetMap (<http://www.openstreetmap.org>) é uma iniciativa que provê mapas livres e editáveis do mundo todo. O OpenStreetMap permite visualizar, editar e usar dados geográficos de maneira colaborativa de qualquer lugar do mundo. Dados geográficos envolvem mapeamentos de campo e deslocamentos que geram custos, por isso na maioria dos casos estas informações não são gratuitas. O projeto OpenStreetMap é uma iniciativa colaborativa de geração de dados geográficos distribuído e realizado pela comunidade. Com o avanço da tecnologia, dispositivos de GPS (*Global Positioning System*) estão cada vez mais acessíveis e permitem que um grande número de pessoas, incluindo entusiastas e profissionais, consigam mapear regiões com uma precisão antes possível apenas por equipes especializadas. Um estudo realizado em 2008 e apresentado em (HAKLAY; WEBER, 2008) fez uma avaliação do crescimento da colaboração das pessoas com o projeto e (HAKLAY, 2010) realizou uma comparação entre os mapas disponíveis no OpenStreetMap e mapas oficiais da região de Londres. Os resultados destes estudos demonstram que, com algumas ressalvas, a qualidade geral da informação produzida pela comunidade é comparável com as informações geradas e utilizadas por órgãos oficiais em estudos governamentais.

Outra vantagem da utilização de ferramentas colaborativas como OpenStreetMap é que todos os dados publicados são disponibilizados e a comunidade pode contribuir e refinar cada vez mais as informações. No período deste estudo, boa parte do anel central de Londrina já está disponível, incluindo pontos de referência e informações sobre as vias. Todas as informações ali publicadas são, obrigatoriamente e automaticamente, de domínio público, não cabendo a cobrança de *royalties* ou taxas de utilização. O OpenStreetMap possui dados abertos, licenciados sob a licença *Creative Commons Atribuição-Compartilhamento Pela Mesma Licença 2.0* (CC-BY-SA - <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/>). Isto significa que todos estão livres para copiar, distribuir, transmitir e adaptar os mapas e dados, desde seja dado crédito ao OpenStreetMap e seus colaboradores. Se forem feitas alterações ou criações sobre os mapas ou dados, o responsável deve distribuir os resultados apenas sobre a mesma licença.

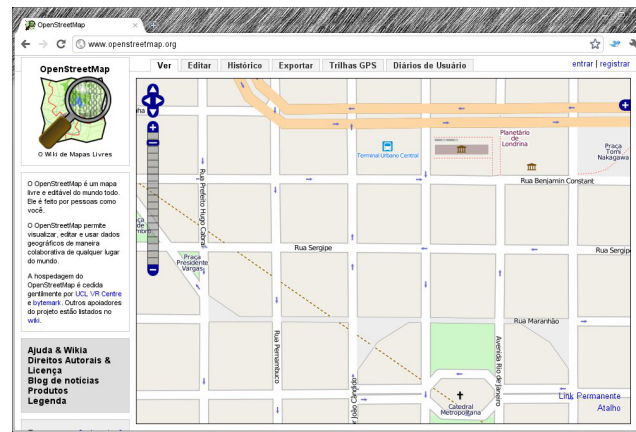


Figura 3.1: Página do projeto OpenStreetMap.

3.1.2.2 JOSM

Como os dados do OpenStreetMap são contribuições da comunidade e podem conter incorreções ou imprecisões, existem ferramentas que permitem que os interessados possam, quando estas incorreções ou imprecisões são detectadas, corrigi-las. Toda correção ou nova informação pode ser imediatamente devolvida aos servidores centrais do projeto, beneficiando assim toda a comunidade envolvida. O software JOSM (<http://josm.openstreetmap.de>), ou *Java OpenStreetMap Editor*, é uma destas aplicações, desenvolvida inicialmente por Immanuel Scholz e mantida atualmente por Dirk Stöcker. O JOSM é um software aberto e licenciado sob a GPL (*GNU Public License* - <http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>), que permite o seu uso e modificação por qualquer pessoa com a condição de que toda alteração ou correção deve ser devolvida, sob os mesmos termos, à comunidade.

Com o JOSM é possível a edição dos arcos e nós dos mapas a serem editados, permitindo que o modelo de simulação reflita com maior precisão as características do mundo real e, ao mesmo tempo, contribuindo para a melhora das informações disponíveis à toda a comunidade OpenStreetMap.

3.1.2.3 eWorld

O software eWorld é um *framework* que importa mapas de diferentes provedores, inclusive do projeto OpenStreetMap e permite que eles sejam visualizados, editados e melhorados com a adição de eventos ou atributos adicionais antes de serem passados para simuladores de tráfego, como o SUMO - *Simulation of Urban Mobility* (KRAJZEWICZ et al., 2002a) ou o VanetMobiSim. O eWorld é um projeto

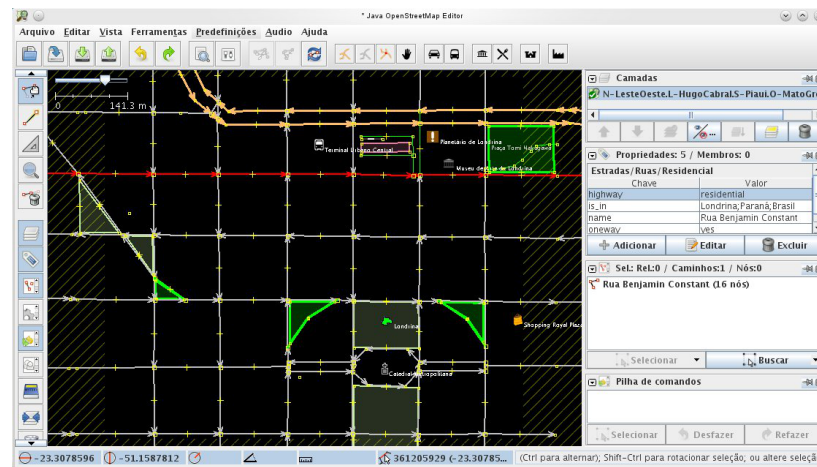


Figura 3.2: Java OpenStreetMap Editor.

desenvolvido pelo Hasso Plattner Institute em Potsdam na Alemanha¹.

O eWorld permite que os dados do OpenStreetMap sejam importados diretamente ou via arquivos, diretamente via a sua interface. Os dados importados podem ser visualizados e ampliados usando ferramentas simples e sua grande contribuição é a possibilidade da introdução de eventos ambientais associados a estes dados. Estes eventos podem ser: a definição de fluxos de tráfego, a definição de situações climáticas agindo sobre uma determinada área (tais como nevoeiros, neve, chuva e gelo), informações sobre acidentes ou bloqueios temporários em vias e interseções, definição da localização de paradas de ônibus e pontos de interesse que possam, de alguma maneira, alterar as características dos fluxos de tráfego existentes.

O eWorld permite ainda a configuração de semáforos nas interseções, incluindo a definição de tempos de ciclo e regras de conversão (BECK et al.,). Todos os eventos (com a exceção dos não temporários, como os semáforos e pontos de interesse) podem ser tratados como temporários e uma linha de tempo permite a definição do período e duração dos acontecimentos durante a simulação. Isto permite que seja possível a modelagem de uma determinada área e que, por exemplo, sejam avaliadas as conseqüências de uma chuva que aconteça durante o período de pico do tráfego nesta região, ou ainda, avaliar qual o impacto de uma interrupção em uma via para a sua manutenção. Com as informações obtidas da simulação de diferentes cenários, as equipes responsáveis podem escolher os melhores períodos para a realização das atividades ou mesmo prever as conseqüências que venham a ser causadas em outras regiões.

O eWorld foi desenvolvido usando uma arquitetura que permite que novas fun-

¹http://www.hpi.uni-potsdam.de/meinel/projekte/more_projects/vehicular_networks.html

cionalidades possam ser desenvolvidas e agregadas à solução principal via *plugins*, permitindo que eventos específicos ainda não cobertos pelo framework sejam inseridos e utilizados em conjunto com as ferramentas existentes. Todo o framework é licenciado também sob a GPL (*GNU Public License* - <http://www.gnu.org/licenses/old-licenses/gpl-2.0.html>).

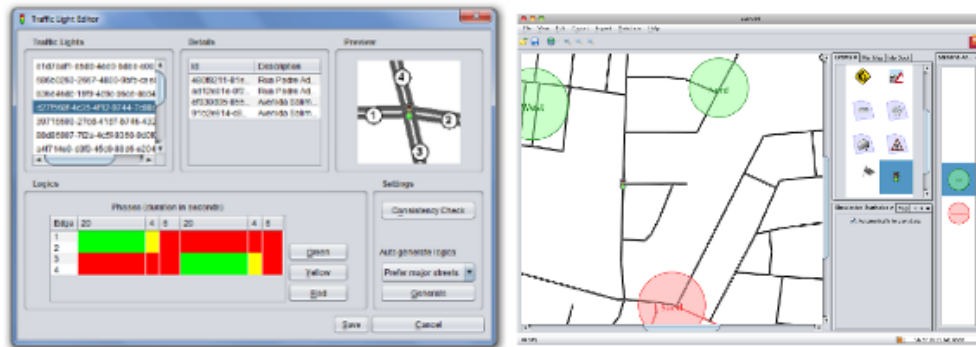


Figura 3.3: eWorld 0.9.1a. Edição de semáforos e eventos.

3.1.2.4 TrafficModeler

O TrafficModeler é uma ferramenta de geração e modelagem de fluxos de tráfego desenvolvida e distribuída como uma aplicação em código livre. O objetivo principal do TrafficModeler é simplificar o processo da definição de fluxos de tráfego para ambientes de simulação através da definição de abstrações em nível mais amplo, utilizando uma interface gráfica de uso simplificado (PAPALEONTIOU; DIKAIKOS, 2009).

A modelagem da definição de tráfego é estruturada de maneira a combinar tanto tráfego normal quanto o tráfego causado por situações especiais. O TrafficModeler gera tráfego para o microssimulador SUMO - *Simulation of Urban MObility* (KRAJZEWICZ et al., 2002a). O SUMO representa a rede viária através de um grafo direcional codificado em um arquivo XML (*eXtensible Markup Language*) e o tráfego simulado pelo SUMO também é representado neste formato. Os arquivos XML contêm as definições de *rotas* e *viagens* que correspondem, respectivamente, às trajetórias intra-nós e entre-nós. Para que o SUMO realize a simulação é necessário que o usuário especifique o tipo e a rota de cada veículo participante da simulação, o que torna esta tarefa extremamente complexa e demorada. O TrafficModeler ataca exatamente esta questão, permitindo a especificação do tráfego veicular através de abstrações de nível mais alto e posteriormente traduzindo estas abstrações para o nível mais baixo requerido pelo SUMO.

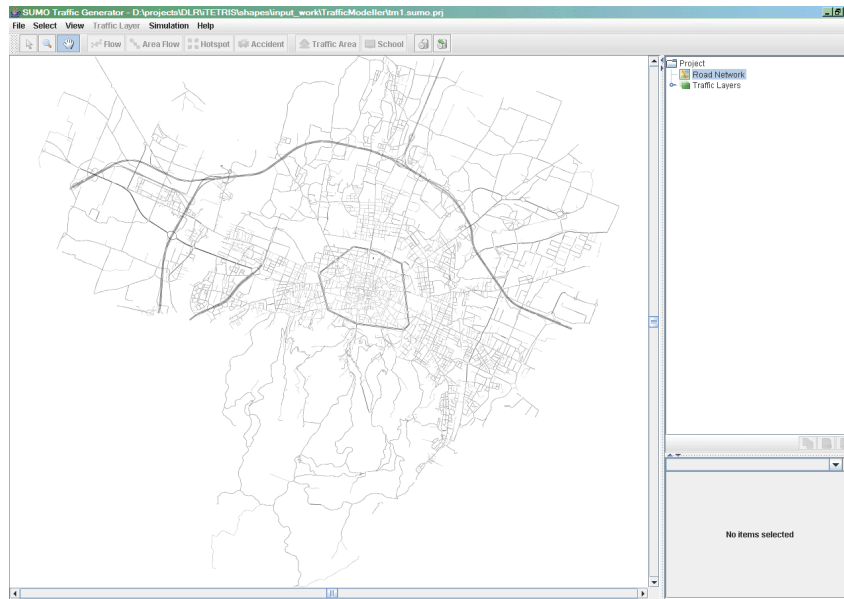


Figura 3.4: TrafficModeller versão 1.0.

3.1.3 Simulação dos cenários avaliados

Nesta etapa o modelo preparado é introduzido no microsimulador e executado, com a conseqüente comparação dos resultados obtidos nos relatórios estatísticos de saída e a avaliação da saída visual provida pelo sistema. Esta etapa deve ser realizada como um experimento estatístico rigoroso, sendo que os níveis de sofisticação das análises varia conforme a exigência e necessidade da situação modelada (LIEBERMAN; RATHI, 1999). Em se tratando de um processo estocástico, tanto (LIND et al.,) quanto (LIU, 1994) sugerem a avaliação dos resultados associados a múltiplas rodadas de simulação.

3.1.3.1 SUMO - *Simulation of Urban MObility*

O SUMO - *Simulation of Urban MObility* é um microsimulador de tráfego em código aberto, de tempo contínuo (*space-continuous*) que trabalha com eventos discretos. O sistema é desenvolvido pelo *Institute of Transportation Research* do *German Aerospace Centre* (KRAJZEWICZ et al., 2002a). Toda sua concepção foi direcionada para a simulação de redes de tráfego do tamanho de uma cidade.

O desenvolvimento do SUMO - *Simulation of Urban MObility* iniciou-se no ano 2000, com o objetivo principal de disponibilizar à comunidade de pesquisa em gerenciamento de tráfego uma solução de microsimulação em software livre que permitisse a implementação de seus próprios algoritmos, sem a necessidade de se preocuparem em desenvolver uma solução completa de microsimulação (KRAJZEWICZ et al., 2002a).

A simulação é multimodal, ou seja, não apenas os movimentos dos carros são modelados, mas também toda a infraestrutura de transporte público, incluindo aí redes de trens e metrô, sendo que, internamente, a parte atômica (não divisível) da simulação é a representação de uma pessoa. Esta pessoa é descrita no modelo pelo seu tempo de saída e a rota que ela segue e esta rota é formada por sub-rotas que descrevem uma única modalidade de tráfego.



Figura 3.5: Sistema multimodal

Uma pessoa pode sair de sua origem usando uma forma (modo) de transporte, chegar a uma estação de transporte público e trocar este modo. Além da movimentação realizada usando meios de transporte, uma pessoa pode ainda andar. O andar em si não é simulado mas toda a modelagem estima o tempo que esta pessoa levaria para alcançar o seu destino. Na figura 3.5 vemos um exemplo de rota composta multimodal.

Modelo implementado O modelo de simulação *car-following* usado no SUMO é uma extensão do modelo de Gipps (GIPPS, 1986) resultante do trabalho de (KRAUSS, 1998). Este modelo é capaz de descrever tanto situações de tráfego livre quanto congestionado. A cada passo no tempo da simulação a velocidade do veículo é adaptada à velocidade do veículo-líder de modo a tornar o sistema livre de colisões no decorrer do próximo passo. Esta velocidade é chamada de v_{safe} e é calculada usando a equação:

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)\tau}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + \tau} \quad (3.1)$$

- $v_l(t)$: velocidade do veículo-líder no tempo t
- $g(t)$: *gap* (brecha) para o veículo-líder no tempo t
- τ : tempo de reação do motorista (geralmente 1s)
- b : função de desaceleração

Para conciliar a aceleração com os limites físicos dos veículos, a velocidade *desejada* v_{des} é computada como o mínimo da função entre a velocidade máxima

possível, a velocidade do veículo somada à máxima aceleração e a velocidade segura v_{safe} definida na equação 3.1. Deste modo um veículo não irá trafegar nem acelerar mais do que seja possível:

$$v_{des}(t) = \min [v_{safe}(t), v(t) + a, v_{max}] \quad (3.2)$$

Continuando, o motorista é simulado assumindo-se que ele é passível de erros e pode não se adaptar perfeitamente ao comportamento de velocidade desejada. Este aspecto é levado à simulação através da subtração de um fator aleatório *erro humano* da velocidade desejada.

$$v(t) = \max [0, rand [v_{des}(t) - \epsilon a, v_{des}(t)]] \quad (3.3)$$

Como o veículo não deve andar para trás, novamente - após os cálculos anteriores - o máximo da velocidade calculada e zero deve ser avaliado e este será o valor da velocidade final do veículo para o passo corrente. Uma avaliação completa e detalhada de todos os componentes, cálculos e hipóteses envolvidas neste modelo podem ser encontradas em (KRAUSS, 1998).

Semáforos Os semáforos são parte importante da simulação e podem diretamente influenciar no fluxo do tráfego. No SUMO, além das configurações de vias preferenciais, cada interseção pode ter um semáforo associado. Estes semáforos podem ser programados e configurados independentemente ou seguir um padrão pré-definido.

Saída da simulação Na última versão disponível, a 0.12.0, o SUMO disponibiliza dois tipos diferentes de saída para a simulação: a saída *raw* (ou "crua"), que contém todos os arcos (vias), faixas e os veículos por lá passando em cada passo de tempo, onde os veículos são identificados individualmente através de seu nome, posição e velocidade. Esta saída é extremamente completa e pode ser utilizada em processos pós-processamento para uma avaliação mais detalhada.

A outra saída disponibilizada é um arquivo de *log* gerado pela simulação com dados gerados por detectores simulados que podem ser posicionados em locais definidos de cada faixa. Estes detectores simulam o comportamento de laços indutores e podem computar o fluxo, a velocidade média na faixa, entre outros valores. Cada detector gera um arquivo independente, o que permite a avaliação individual de cada situação.

Paradigma de desenvolvimento Um dos objetivos principais do desenvolvimento do SUMO é a sua "abertura", ou seja, a possibilidade de ser melhorado e expandido para atender um número infinito de situações. Partindo desta premissa, todo o desenvolvimento é feito usando a linguagem C++, com o cuidado de utilizar apenas as funcionalidades padronizadas da linguagem. Esta característica, aliada à extensa documentação para desenvolvedores, permite que o software seja portado para a maioria dos sistemas. O SUMO já foi compilado e validado para os seguintes ambientes (KRAUSS, 1998):

- Microsoft Windows[®] usando o Microsoft Visual C++
- Solaris[®] usando o compilador SUN-C++
- Linux usando o compilador gcc

Módulos adicionais O SUMO é mais do que uma única aplicação. Ele é formado por módulos individuais e independentes que permitem a preparação e construção de dados necessários para a simulação e pesquisa. Dentre estes módulos, podemos citar:

- **NETCONVERT**

A descrição da malha viária utilizada pelo SUMO é altamente complexa e a sua preparação é virtualmente impossível de ser feita a mão. Para realizar esta tarefa é utilizado o módulo **NETCONVERT** que tem como papel principal a conversão de listas de dados básicos (como a relação de arcos e nós) em uma rede SUMO completa. No decorrer deste processo, o **NETCONVERT** lê os dados de entrada, efetua a conversão necessária para gerar a entrada esperada pelo SUMO e grava os resultados em um arquivo XML. Na versão atual, o **NETCONVERT** aceita quatro tipos diferentes de dados que podem ser convertidos para redes SUMO:

- Arquivos XML simples contendo os arcos, tipos dos arcos e nós
- Arquivos CSV contendo os arcos, tipos dos arcos e nós
- Redes do software VISUM²
- Dados de entrada do software Cell (EISSFELDT; GRAFE; WAGNER, 2003)

²<http://www.ptvag.com/software/transportation-planning-traffic-engineering/software-system-solutions/visum/>

Para uma simplificação ainda maior deste processo, pode-se utilizar ferramentas externas para a realização desta tarefa, tais como o eWorld, descrito na seção 3.1.2.3.

- **DUAROUTER**

A simulação, além da parte estática representada pela malha viária, consiste basicamente de veículos em movimento. Para que uma simulação seja o mais realista possível, os veículos não podem simplesmente ser distribuídos estatisticamente pelas vias. É necessário utilizar como base o planejamento diário das pessoas, consistindo de rotas específicas e tempos de saída também específicos. O **DUAROUTER** gera estes dados tendo como entrada as informações de tempo de saída, origens e destinos de um conjunto de pessoas virtuais que serão simuladas e, com base nestes dados, usando o algoritmo de roteamento de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959), gera as rotas pela malha viária.

- **JTRROUTER**

Outra maneira de se gerar as rotas para a simulação é a utilização do *JTRROUTER*, que tem como característica a utilização como dados de entrada as medidas de fluxo de tráfego e as probabilidades de conversão dos veículos em cada junção. Os valores de probabilidade de conversão nas junções podem ser especificados para diferentes períodos de tempo, possibilitando a simulação de cenários complexos sem a necessidade de utilização de matrizes de origem e destino completas.

Para uma simplificação ainda maior do processo de geração de rotas, ferramentas externas podem ser utilizadas para a realização da tarefa, tais como o TrafficModeler, descrito na seção 3.1.2.4.

3.1.4 Calibração e validação do modelos

A confiabilidade de um ambiente de simulação está diretamente ligada à sua capacidade de produzir resultados próximos da realidade, porém, como muitas das variáveis e parâmetros de entrada são de difícil medição em campo ou às vezes simplesmente impossíveis de serem obtidas, o desempenho do modelo é substancialmente afetado nos casos de simulação de sistemas de trânsito.

A calibração é o processo de ajustar os dados e parâmetros de entrada disponíveis de modo a alcançar a melhor equivalência entre os resultados da simulação e os verificados no mundo real. Este processo é realizado de forma

iterativa, onde os parâmetros são ajustados até que o modelo gere resultados equivalentes, ou próximos o suficiente, dos dados obtidos nas observações de campo. É importante salientar que, além da mera análise dos dados quantitativos, a fase de calibração exige um alto nível de conhecimento sobre o comportamento do tráfego avaliado (LIND et al.,).

Um estudo sobre a calibração e a validação de modelos e os métodos de como obter tais dados usando o SUMO é descrito em (KRAJZEWICZ et al., 2002b). A calibração é baseada na comparação entre os dados captados por detectores reais instalados em uma via e compará-los à saída gerada por detectores virtuais posicionados nas mesmas posições no ambiente simulado. Após cada simulação, os parâmetros do modelo eram refinados e a simulação reiniciada. A função de erro a ser minimizada é demonstrada pela equação 3.4. O fluxo dos dados e fluxo de execução dos programas do processo pode ser visto na figura 3.6.

$$e(p) = \frac{\langle |T_{sim}(p) - T_{obs}| \rangle}{\langle T_{obs} \rangle} \quad (3.4)$$

$T_{sim}(p)$: tempo de viagem simulado

$T_{obs}(p)$: tempo de viagem observado

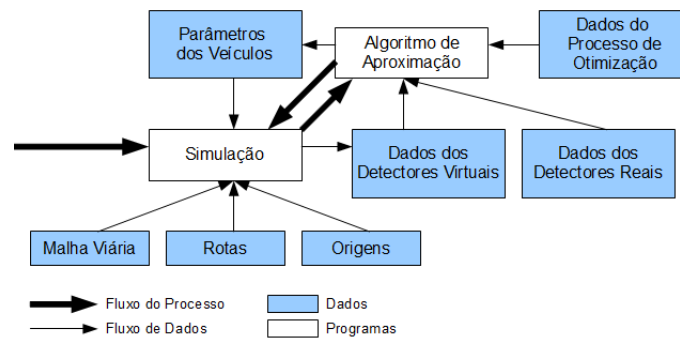


Figura 3.6: Fluxo dos dados e de execução dos programas

Após a aplicação desta metodologia, o estudo mostrou que a qualidade e acuidade do modelo saiu de um patamar de erros de 40% para a faixa de 15%.

Um outro estudo, apresentado em (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMANNIL, 2003), propõe uma metodologia mais genérica, passível de ser aplicada em diferentes ambientes de microsimulação, dividida em três estágios. O processo de validação trabalha com três variáveis de medida para os erros, o *RMSP* - *Root Mean Squared Percent Error*, definido na equação 3.5, o **coeficiente de correlação** (r), definido na equação 3.6 e o *Theil's Inequality Coefficient* U , definido na equação 3.7.

O *RMSP* - *Root Mean Squared Percent Error* pode prover uma estimativa inicial razoável para o grau de ajuste entre as medidas de tráfego reais e as simuladas. Esta medida de erro provê uma estimativa do percentual total de erro.

$$RMSP = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - y_i}{y_i} \right)^2} \quad (3.5)$$

x_i : valor da medida do tráfego simulado no tempo i

y_i : valor da medida do tráfego real no tempo i

O **coeficiente de correlação** (r) é outra medida popular para a avaliação da qualidade do ajuste usada para medir a força da associação linear entre as medidas de tráfego reais e as simuladas.

$$r = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \quad (3.6)$$

\bar{x} : média dos valores medidos do tráfego simulado

\bar{y} : média dos valores medidos do tráfego real

σ_x : desvio padrão dos valores medidos do tráfego simulado

σ_y : desvio padrão dos valores medidos do tráfego real

A medida de qualidade de ajuste definida pelo **Theil's Inequality Coefficient** U é mais sensível que o *RMSP* ou r e pode ser decomposta em três outras métricas que provêm informações mais específicas sobre a natureza dos erros.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 + \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}} \quad (3.7)$$

O quadrado do numerador na equação 3.7 pode ser decomposto nos três componentes da equação:

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2 = (\bar{y} - \bar{x})^2 + (\sigma_x - \sigma_y)^2 + 2(1 - r)\sigma_y\sigma_x \quad (3.8)$$

Baseado nas equações 3.7 e 3.8, três componentes de U podem ser derivados U_m , U_s e U_c , que podem ser usados para medir diferentes aspectos do erro entre os tráfego simulado e o real. Estes componentes são definidos como:

$$U_m = \frac{n(\bar{y} - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.9)$$

$$U_s = \frac{n(\sigma_y - \sigma_x)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.10)$$

$$U_c = \frac{2(1-r)n\sigma_y\sigma_x}{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3.11)$$

U_m : proporção de viés (*bias proportion*), que é uma medida de erro sistemática que pode ser usada para determinar sobrecontagem e subcontagem consistentes causadas por excesso/falta de veículos

U_s : proporção de variância (*variance proportion*) que pode ser usada para medir a habilidade das medidas simuladas em replicar o grau de variância (flutuações) das medidas reais

U_c : proporção de covariância (*covariance proportion*), que é uma medida de erro não sistemática

r : coeficiente de correlação entre os dados simulados e os dados reais

O processo de calibração é dividido então em três estágios, com o objetivo de alcançar a melhor relação de correspondência entre os dados reais e os dados simulados, ajustando-se os parâmetros do microssimulador. Os parâmetros a serem ajustados podem ser classificados em duas categorias principais: parâmetros globais (aqueles que afetam a performance do modelo como um todo) e parâmetros locais (aqueles que afetam apenas seções específicas da malha viária). Como exemplos de parâmetros globais podemos citar as características dos veículos (largura, comprimento, velocidade desejada, taxas de aceleração e desaceleração e espaçamento mínimo). Já como exemplo de parâmetros locais, podemos citar os limites de velocidade individuais das vias. Durante o processo de calibração, os parâmetros globais devem ser calibrados primeiro, seguidos da calibração dos parâmetros locais (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003).

O processo de calibração é então dividido em dois estágios principais, baseados no volume de tráfego e velocidade, seguido de um terceiro estágio opcional em que as variáveis de controle dependem do objetivo específico da simulação. Por exemplo, se o objetivo principal da simulação é a validação de um algoritmo de controle de rampas de acesso, os dados relativos à fila desta rampa de acesso podem ser usados como variáveis neste terceiro estágio. Para efeitos deste trabalho, apenas os estágios não opcionais serão avaliados.

Estágio 1: Calibração baseada no volume O objetivo deste estágio é fazer com que os volumes de tráfego gerados pela simulação sejam os mais próximos possíveis dos dados reais. Os parâmetros do microssimulador a serem ajustados neste estágio são os relacionados às características dos veículos, tais como velocidade, taxas de aceleração e desaceleração e outros relacionados à interação entre os veículos.

Quando os parâmetros globais são calibrados, o foco principal deve ser na obtenção de valores aceitáveis para as três medidas de erro, $RMSP$, r e U . No primeiro estágio, geralmente, a possibilidade de alcançar uma alta precisão é baixa, mas pode-se procurar alcançar valores inferiores a 15% para o $RMSP$, r superior a 0,8 e U inferior a 0,3. Valores insatisfatórios para $RMSP$ ou r podem ser atribuídos diretamente à valores impróprios dos parâmetros globais, tais como a velocidade dos veículos e taxas de aceleração ou desaceleração, que devem ser calibrados. As medidas mais sensíveis, U_m , U_s e U_c , provêm dicas sobre a natureza da discrepância entre os valores de volume de tráfego reais e simulados, e devem ser utilizados para guiar e direcionar quais os parâmetros devem ser alterados. A tabela abaixo resume os valores considerados aceitáveis para cada uma das medidas (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003).

| Medida | Valor Aceitável |
|--------|-----------------|
| $RMSP$ | abaixo de 15% |
| r | acima de 0,8 |
| U | abaixo de 0,3 |
| U_m | abaixo de 0,1 |
| U_s | abaixo de 0,1 |
| U_c | acima de 0,9 |

Estágio 2: Calibração baseada na velocidade O objetivo deste estágio é fazer com que a velocidade de cruzeiro dos veículos na simulação sejam as mais próximas possíveis das velocidades observadas nas medições reais. Os parâmetros do microssimulador a serem ajustados neste estágio são basicamente relacionados aos limites locais das vias estudadas, porém alterações nos valores globais relacionados às características dos veículos, tais como velocidade e taxas de aceleração e desaceleração, podem ser utilizados como ajuste fino.

A comparação entre as velocidades reais detectadas e os dados da simulação podem ser feitos através de gráficos. Na falta de detectores de laço duplos (usados para a obtenção de dados de velocidade reais), as velocidades podem ser derivadas das medidas de volume e taxas de ocupação obtidas de detectores de laço simples, através da seguinte equação:

$$S = (0.11 * Vol * (L_v + L_d)) / (O_{cc}) \quad (3.12)$$

- S : velocidade em Km/h
 Vol : volume de tráfego no detector em 5 minutos
 L_v : comprimento médio dos veículos (em metros)
 L_d : comprimento efetivo do detector (em metros)
 O_{cc} : taxa de ocupação do detector (em %)

3.1.5 Documentação e análise dos resultados

Nesta etapa é realizada a comparação dos resultados nos relatórios de saída e avaliação da visualização gráfica animada da simulação. A resposta gerada pela simulação deve ser avaliada por pessoal técnico com conhecimento das características do ambiente. Ela pode ser utilizada como base para a demonstrações direcionadas às pessoas leigo, como, por exemplo, responsáveis por órgãos de execução ou pessoal administrativo sem conhecimento técnico para uma avaliação qualitativa individual.

4 Microsimulação de Tráfego com Software Livre na Implantação de Corredores Exclusivos para Ônibus

4.1 Introdução

Característica quase que inerente à sociedade moderna, o tráfego rodoviário urbano assume papel de significativa importância, tanto no aspecto social quanto na atividade econômica. O sistema de tráfego urbano forma uma rede que conecta os indivíduos aos seus pontos de interesse, dando suporte tanto à necessidade humana básica de ir e vir quanto ao escoamento da produção e desenvolvimento de serviços e atividades sociais.

O crescimento do tráfego urbano inevitavelmente leva a situações de congestionamentos na maioria das grandes cidades do mundo. Como a demanda por deslocamentos cresce a uma taxa maior que a disponibilização de novas vias para absorvê-los, a situação tende a deteriorar-se gradativamente, a menos que novas e melhores estratégias de gerenciamento de tráfego sejam aplicadas.

Para analisar o desempenho e avaliar o impacto de políticas e estratégias de controle de tráfego é necessário modelar o comportamento do fluxo na infraestrutura viária. Diante da complexidade do sistema de tráfego, em particular o urbano, à medida que envolve inúmeras variáveis relacionadas tanto com a oferta quanto com a demanda viária, a técnica de simulação, entre as diversas técnicas utilizadas, tem-se constituído uma importante ferramenta para auxiliar no apontamento de soluções para os vários problemas do trânsito. Com as simulação, podem-se analisar vários cenários e antecipar os impactos positivos e negativos causados a partir da implantação de uma determinada alternativa (PORTUGAL, 2005).

A simulação, como ferramenta, permite a representação de malhas viárias

complexas, levando em consideração as diferentes modalidades de transporte existentes. Dessa maneira, podem ser avaliados cenários que vislumbrem a utilização de meios de transporte alternativos, mudanças na geometria das vias e soluções temporárias ou alternativas, sem a necessidade de intervenções físicas ou levantamentos de dados em campo muito extensos, diminuindo consideravelmente os custos envolvidos no gerenciamento do tráfego.

Neste contexto, este trabalho oferece uma metodologia de integração entre soluções de software livre, soluções estas que, integradas, permitem a formação de um ambiente de microsimulação que permite a avaliação de desempenho, segundo um critério, de diferentes cenários de tráfego. Serão apresentadas soluções em software livre, que além da realização das tarefas citadas, permitem também simular como os diferentes cenários e alternativas previstas se comportam em condições não típicas, como chuvas e nevoeiros, acidentes ou mesmo impedimentos ocasionais nas vias.

Existem várias soluções e pacotes comerciais para microsimulação, porém estas soluções são fornecidas como *black boxes*, não permitindo a mudança ou adaptação dos modelos utilizados e, em algumas situações, nem os seus parâmetros. Uma solução para microsimulação em software livre provê vantagens que vão muito além da redução do custo de aquisição, uma vez que estas soluções dão ao usuário o direito não só de utilizar a solução sem custos, mas também de estudá-la e modificá-la sem quaisquer restrições.

Tome-se como exemplo a cidade de Londrina, Paraná, onde os setores de gerenciamento da malha viária estão aplicando uma série de alterações como a retirada de faixas de estacionamento, criação de corredores exclusivos para transporte público coletivo, além de alterações dos tempos semafóricos. Na maioria dos casos, estas alterações são feitas com base em dados empíricos e observações calcadas em tentativa e erro. Os principais fatores que levam à utilização desta metodologia é a falta de ferramentas para o planejamento e avaliação das propostas de alterações, seja pela questão custo, pela falta de informação sobre a disponibilidade de alternativas ou a necessidade de implantação de medidas em caráter de urgência.

Um estudo apresentado em (GARCIA; BRESSAN; SILVA, 2010) elencou variáveis para a comparação entre soluções em software livre e proprietário de modo geral. Analisando estas variáveis, expostas na figura 4.1, e trazendo esta análise para a escolha de uma solução de microsimulação de tráfego urbano, o fator custo não necessariamente impossibilitaria a aquisição de um software proprietário pelos

setores de gerenciamento da malha viária, uma vez que os ganhos em otimização e organização da malha superariam em muito os investimentos iniciais. Os reais empecilhos para a aquisição e utilização do software proprietário recaem principalmente nas variáveis *CCO* (Custo de Customização) e *CUS* (Customização), uma vez que a maioria das soluções comerciais são desenvolvidas e aplicadas no exterior, onde as características, tanto viárias quanto de comportamento dos motoristas, são diferentes das realidades locais brasileiras.

| VARIÁVEL | | VANTAGEM |
|---|---|-----------------------|
| Custo Total | CLI - Custo de Licença | Software Livre |
| | CPA- Custo de Aquisição | Software Livre |
| | CAT - Custo de Atualização | Software Livre |
| | CSM - Custo de Suporte, Manutenção e Operação | Sem Consenso |
| | CCO - Custo de Customização | Software Livre |
| RCF - Rapidez na Correção de Falhas | | Software Livre |
| QTD - Qualidade Técnica do Sistema/Desempenho | | Software Livre |
| SOC - Socialização do Conhecimento | | Software Livre |
| DRF - Dependência em Relação a Fornecedores | | Software Livre |
| CUS - Customização | | Software Livre |
| ESS - Estabilidade e Segurança | | Software Livre |
| ATM - Assistência Técnica e Manutenção | | Sem Consenso |
| CIU - Consistência da Interface do Usuário | | Software Proprietário |
| FIC - Facilidade de Instalação | | Sem Consenso |

Figura 4.1: Software Livre vs Software Proprietário. Adaptado de (GARCIA; BRESSAN; SILVA, 2010)

A utilização de soluções em software livre permite que os setores de gerenciamento da malha viária possam simular e verificar o desempenho da malha viária antes e depois das alterações propostas, com todas as vantagens proporcionadas pelo uso de software livre, sendo as principais a minimização do fator custo total e, principalmente, a possibilidade de alteração e adequação da solução à realidade local.

Dentre as soluções em software livre estudadas, a que melhor atende à proposta deste trabalho é o projeto **SUMO (Simulation of Urban Mobility)**, desenvolvido pelo *Institute of Transportation Research* do *German Aerospace Centre* (KRAJZEWICZ et al., 2002a). O SUMO é formado por um conjunto modular de programas em software livre, sendo que cada módulo é independente dos outros. Isto permite a adequação de cada módulo sem a interferência direta no funcionamento dos demais. Esta abordagem modular permite, também, o desenvolvimento de outras soluções externas que venham a complementar e facilitar o uso do microssimulador nos diferentes cenários a serem avaliados.

4.2 Procedimentos e aplicação para estudo da solução em software livre

O sucesso da modelagem de tráfego aplicada à avaliação de políticas de operação e planejamento baseia-se, principalmente, na comparação de cenários. Tem-se o desempenho de um cenário de referência, representando a realidade, e as novas propostas são avaliadas comparando os resultados com este cenário de referência. A implantação de modelos de tráfego segue uma metodologia genérica basicamente consensual na literatura pesquisada. Para a elaboração da solução proposta, foi utilizada uma compilação das etapas apresentadas por (LIEBERMAN; RATHI, 1999) e (PORTUGAL, 2005), sendo que o foco principal foi o da escolha de soluções em software livre que atendam todas as especificações das diferentes etapas e sejam passíveis de integração, com a consequente formação de uma solução final única e coesa.

- Definição dos cenários
- Levantamento e codificação dos dados
- Simulação dos cenários avaliados
- Calibração e validação do modelo
- Documentação e análise dos resultados

4.2.1 Definição dos cenários

Nesta etapa são definidas as hipóteses básicas a serem adotadas para o sistema. Para tal implementação é necessária a definição e o conhecimento do ambiente a ser modelado, o propósito da modelagem e os elementos a serem considerados para a análise.

A concepção envolve a avaliação do problema e dos elementos representados no modelo: a delimitação da área a ser estudada, a definição dos períodos a serem analisados e a seleção das vias representadas. Para a definição dos elementos representados é necessário verificar principalmente o impacto destes elementos no desempenho do tráfego ou nos parâmetros de análise.

As redes de infra-estruturas de transportes são um meio essencial através das quais as funções das cidades (centros de atividades econômicas e de serviços) podem ser realizadas. Também servem de ligação entre as cidades e os seus

subúrbios, regiões envolventes e outras áreas urbanas. No entanto, a necessidade crescente de mobilidade nas sociedades modernas criou uma situação de sobrecarga em muitos sistemas de transportes, onde a infra-estrutura existente é incapaz de atender as mais diversas necessidades vigentes (CARDOSO, 2007).

Inserido neste contexto, o desenvolvimento deste trabalho ocorre em um momento histórico do gerenciamento de tráfego da cidade de Londrina. Situada ao norte do Paraná, Londrina apresenta população superior a 500 mil habitantes e frota registrada que ultrapassa 273 mil veículos. Devido a recorrência de congestionamentos em alguns dos principais corredores arteriais da malha central, e seu conseqüente impacto de cunho econômico, social e ambiental, a administração pública decidiu pela implantação de corredores exclusivos para ônibus através da remoção da faixa de estacionamento de algumas vias.

Na cidade de Londrina, o ônibus é o único meio de transporte público coletivo disponível. Este não possui qualquer tratamento preferencial, operando no tráfego misto e disputando espaço com os demais veículos. A maioria das vias pelas quais os ônibus circulam têm como característica a intensa circulação de veículos e a formação de filas nos sucessivos cruzamentos semaforizados.

No trabalho desenvolvido por (GODOY, 2010) é apresentada a aplicação da ferramenta TRANSYT/10 na avaliação do desempenho operacional do controle semaforico em três dos principais corredores arteriais da malha viária central da cidade de Londrina. Foram obtidos tempos semaforicos e defasagens para diferentes tamanhos de ciclo de forma a minimizar o tamanho de filas e conseqüentemente o atraso. Foi analisada também a criação de corredores exclusivos para transporte coletivo com a retirada de faixas de estacionamento. Os resultados obtidos em (GODOY, 2010), especificamente os relativos à criação do corredor exclusivo para transporte coletivo na Rua Prof. João Cândido, são objeto de estudo para o atual trabalho. A região central de Londrina, com as vias estudadas em destaque é apresentada na Figura 4.2.

4.2.2 Levantamento e codificação dos dados

Na etapa de levantamento e codificação dos dados são caracterizados os ambientes estudados, com a coleta das informações necessárias à codificação e posterior calibração e validação do modelo. As fontes destes dados envolvem desde observações de campo, levantamento de dados e mapas e a programação operacional implementada pelos órgãos responsáveis. Quando há limitações nas coletas de informação em campo, sejam elas por questões de viabilidade ou custo, (LI-

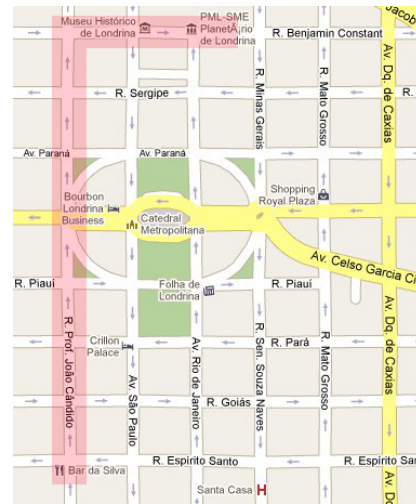


Figura 4.2: Malha Central da Cidade de Londrina-PR. Fonte: Google Maps, 2010

EBERMAN; RATHI, 1999) sugere aceitar os valores referenciais relacionados na bibliografia ou os valores *default* dos parâmetros dos modelos, sendo que esta situação deve ser levada em conta na fase de análise e documentação dos resultados obtidos.

Em termos gerais, tanto (PORTUGAL, 2005) quanto (LIEBERMAN; RATHI, 1999) definem que os dados podem ser agrupados em dois conjuntos principais: os dados da rede viária e os dados da demanda. Os dados da rede descrevem a caracterização geométrica, espacial e operacional da rede viária, na forma de, via de regra, arcos (trechos entre as interseções) e nós (as interseções propriamente ditas). Em (LIND et al.,) podemos encontrar exemplos de dados de arco exigidos pela maioria dos modelos microscópicos: comprimento, número de faixas, largura das faixas, faixas exclusivas, pontos de parada, velocidade limite, etc. Os autores ainda citam como exemplos de dados dos nós: conversões permitidas, programação semafórica, relações de prioridade, áreas para a proibição de bloqueio das interseções, etc.

Os cenários escolhidos são os mesmos utilizados no trabalho de mestrado de Wagner Fontes Godoy (GODOY, 2010). Foram escolhidos para avaliação os mesmos corredores nos quais a administração pública de Londrina optou pela criação de faixas exclusivas de ônibus. O contexto de criação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina ocorreu a partir de Março de 2010. Estes corredores possuem as seguintes características comuns: trechos entre semáforos de 100 metros, sentido único de tráfego e alinhamento praticamente retilíneo, pistas com 9 metros de largura, divididas em duas faixas de rolamento e uma faixa de estacionamento à esquerda e grande circulação de ônibus, sendo que a via em

questão, a Rua Prof. João Cândido, possui comprimento de aproximadamente 700 metros divididos em 7 interseções semaforizadas.

4.2.2.1 Dados da rede viária

Os dados da rede viária são formados pelos dados geográficos, representando a disposição física da malha a ser estudada, e as características específicas desta malha. A obtenção dos dados geográficos envolve mapeamentos de campo e deslocamentos que geram custos, por isso, na maioria dos casos, estas informações não são gratuitas. O projeto **OpenStreetMap** (<http://www.openstreetmap.org>) é uma iniciativa colaborativa de geração de dados geográficos distribuído e realizado pela comunidade. Com o avanço da tecnologia, dispositivos de GPS (*Global Positioning System*) estão cada vez mais acessíveis e permitem que um grande número de pessoas, incluindo entusiastas e profissionais, consigam mapear regiões com uma precisão antes possível apenas por equipes especializadas. Um estudo realizado em 2008 e apresentado em (HAKLAY; WEBER, 2008) fez uma avaliação do crescimento da colaboração das pessoas com o projeto e (HAKLAY, 2010) realizou uma comparação entre os mapas disponíveis no OpenStreetMap e mapas oficiais da região de Londres. Os resultados destes estudos demonstram que, com algumas ressalvas, a qualidade geral da informação produzida pela comunidade é comparável com as informações geradas e utilizadas por órgãos oficiais em estudos governamentais.

O projeto OpenStreetMap disponibiliza vários formatos de se obter as informações geográficas relativas às áreas desejadas, descritos abaixo e ilustrados na figura 4.3:

- Dados estruturados em arquivos XML no formato próprio do OpenStreetMap.
- Imagem no formato PNG para utilização com o *toolkit* Mapnik¹
- Imagem no formato PNG para utilização com a ferramenta Osmarender²
- Código HTML para inserção direta em páginas web

O formato de exportação em arquivo XML do OpenStreetMap gera uma representação estruturada e textual das informações geográficas. Este formato permite o acesso às informações relativas às junções (ou nós) e *links* de forma

¹<http://www.mapnik.org>

²<http://wiki.openstreetmap.org/wiki/Osmarender>

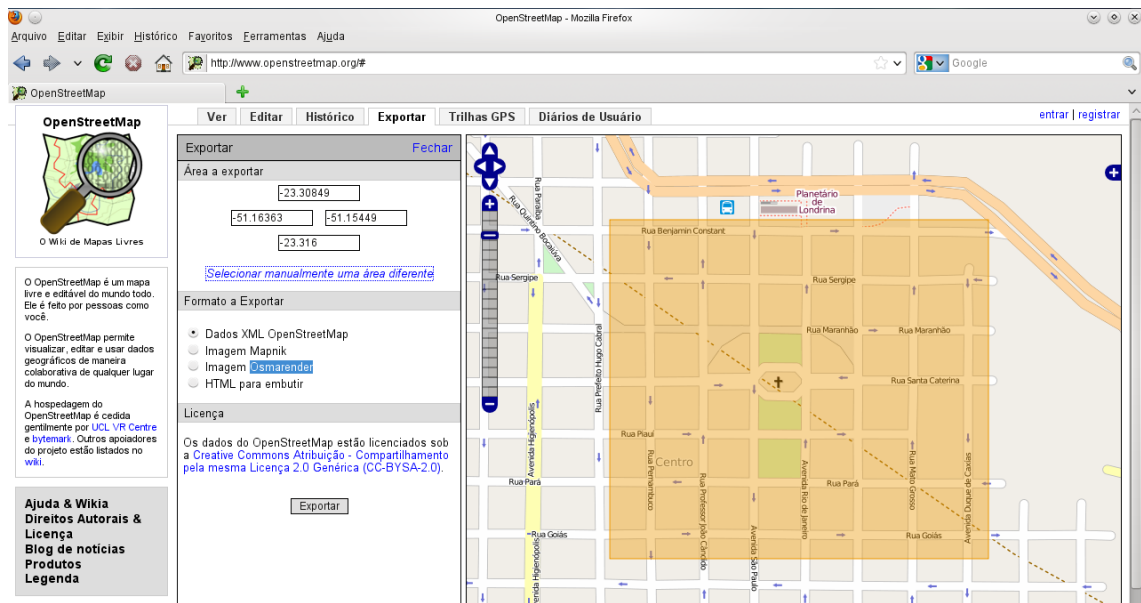


Figura 4.3: Malha Central da Cidade de Londrina importada do OpenStreetMap, Fonte: Projeto OpenStreetMap

direta, sendo possível obter informações sobre as características individuais de cada elemento e, conseqüentemente, adaptando estas informações da maneira desejada.

4.2.2.2 Correção e adequação dos dados importados

Os dados geográficos obtidos do OpenStreetMap podem ser utilizados para diferentes finalidades e, para cada uma destas finalidades, refinamentos especiais devem ser realizados sobre os dados. No caso específico deste trabalho, os dados devem ser refinados para a utilização em ambiente de microssimulação de tráfego, sendo assim, toda informação não pertinente deve ser removida.

Na área importada e utilizada neste trabalho, o quadrilátero delimitado pela latitude 23.3161 S, longitude 51.16224 O e latitude 23.30829 S, longitude 51.15462 O. Nesta área estavam definidos pontos de interesse, tais como a Catedral de Londrina, áreas não disponíveis para tráfego, tais como o calçadão da Av. Paraná, entre outros. Todas estas informações devem ser eliminadas antes da programação do microssimulador. O software JOSM (<http://josm.openstreetmap.de>), provê todas as ferramentas para a execução desta tarefa. Na figura 4.4 está o mapa original e o mapa refinado. Pode-se notar a diferença entre os dados originais importados e o resultante, após a limpeza.

Após a limpeza, foram corrigidas também as características das vias estudadas, mais especificamente a inclusão dos semáforos, relação de prioridades de conversão e a troca da faixa de estacionamento pela faixa exclusiva para trans-

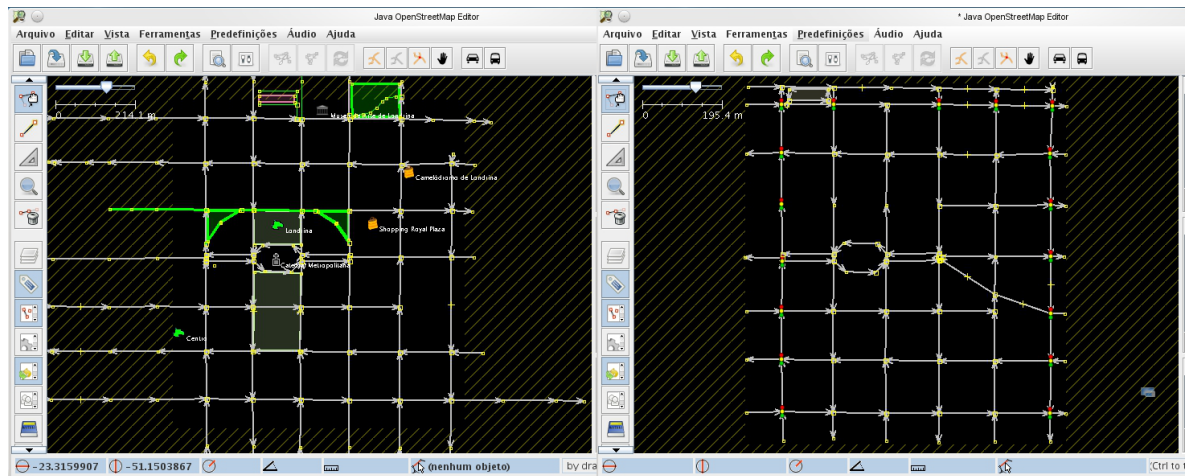


Figura 4.4: Dados originais importados no JOSM e resultado após o refino

porte coletivo. Seguindo o implementado pela administração pública de Londrina, a faixa exclusiva foi adicionada à direita da via.

4.2.2.3 Configuração dos planos semafóricos

Para a configuração dos planos semafóricos foi utilizado o software **eWorld** (<http://eworld.sf.net>). O eWorld é um projeto desenvolvido pelo Hasso Plattner Institute em Potsdam na Alemanha³ que permite que os dados do OpenStreet-Map sejam importados diretamente ou via arquivos, via a sua interface. Os dados importados podem ser visualizados e ampliados usando ferramentas simples e sua grande contribuição é a possibilidade da introdução de eventos ambientais associados a estes dados. Estes eventos podem ser: a definição de fluxos de tráfego, a definição de situações climáticas agindo sobre uma determinada área (tais como nevoeiros, neve, chuva e gelo), informações sobre acidentes ou bloqueios temporários em vias e interseções, definição da localização de paradas de ônibus e pontos de interesse que possam, de alguma maneira, alterar as características dos fluxos de tráfego existentes.

O eWorld provê uma interface gráfica para a configuração de semáforos nas interseções, incluindo a definição de tempos de ciclo e regras de conversão (BECK et al.,). Todos os eventos (com a exceção dos não temporários, como os semáforos e pontos de interesse) podem ser tratados como temporários e uma linha de tempo permite a definição do período e duração dos acontecimentos durante a simulação. Isto permite que seja possível a modelagem de uma determinada área e que, por exemplo, sejam avaliadas as conseqüências de uma chuva que aconteça durante o período de pico do tráfego nesta região, ou ainda, avaliar

³http://www.hpi.uni-potsdam.de/meinel/projekte/more_projects/vehicular_networks.html

qual o impacto de uma interrupção em uma via para a sua manutenção. Com as informações obtidas da simulação de diferentes cenários, as equipes responsáveis podem escolher os melhores períodos para a realização das atividades ou mesmo prever as conseqüências que venham a ser causadas em outras regiões.

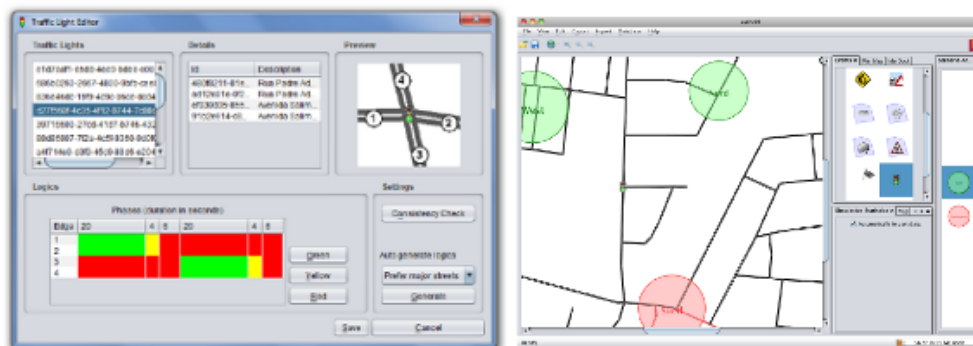


Figura 4.5: eWorld 0.9.1a. Edição de semáforos e eventos.

Neste estudo foram usados alguns dos planos semaforicos avaliados no trabalho de (GODOY, 2010), todos já aplicados sobre as vias com a introdução das faixas exclusivas, apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Cenários de avaliação

| | Cenários | | |
|-------------------------|----------|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Tempo de ciclo (s) | 45 | 60 | 75 |
| Otimiz. verde/defasagem | Sim | Sim | Sim |
| Faixas de fluxo geral | 2 | 2 | 2 |
| Faixa de estacionamento | Não | Não | Não |
| Faixa de ônibus | Sim | Sim | Sim |

4.2.2.4 Geração da demanda

Com base nos dados fornecidos pelo IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina - Diretoria de Trânsito e Sistema Viário) foi possível obter das contagens classificadas os fluxos de veículos que trafegam pelas interseções do corredor selecionado. Para efeito deste estudo, considerou-se apenas o período de maior movimentação do dia - das 17h45 às 18h45 - e também a separação entre a quantidade de veículos de passeio (carros e caminhonetes) e de ônibus. Apesar de constarem nos dados fornecidos, o fluxo de motocicletas não foi utilizado neste estudo. A escolha deste período se dá em função desta subrede possuir em sua maioria semáforos eletromecânicos, por esta razão, somente uma programação semaforica é permitida. Assim, optou-se por avaliar a situação para o pior caso, ou seja o de maior demanda veicular.

Como exemplo, a Tabela 4.2 mostra os fluxos verificados em uma interseção de conexão (junção) do trecho em estudo: Rua Benjamin Constant com Rua Prof. João Cândido. Considerando tratar-se de vias com sentido único de circulação, os movimentos observados separadamente foram de fluxo direto e de conversões à direita e à esquerda.

Tabela 4.2: Fluxos de tráfego (veículos/período)

| Horário | R.Benjamin Constant (O-L) | | | | R.Prof. João Candido (S-N) | | | |
|---------------|---------------------------|--------|----------|--------|----------------------------|--------|---------|--------|
| | Fluxo Direto | | Esquerda | | Fluxo Direto | | Direita | |
| | Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus |
| 17:45 a 18:00 | 112 | 24 | 38 | 6 | 158 | 1 | 31 | 25 |
| 18:00 a 18:15 | 149 | 28 | 48 | 8 | 203 | 2 | 33 | 30 |
| 18:15 a 18:30 | 122 | 30 | 46 | 7 | 238 | 1 | 35 | 23 |
| 18:30 a 18:45 | 87 | 28 | 25 | 6 | 192 | 1 | 27 | 21 |

Fonte: Contagens IPPUL 2008

Para a geração da demanda foi utilizado o módulo **JTRROUTER** do **SUMO**, que utiliza medidas de fluxo e probabilidades de conversão em cada junção. Esta escolha deveu-se à não disponibilidade de matrizes de origem e destino completas. Calculando-se as probabilidades, baseadas nas contagens fornecidas pelo IPPUL, chegou-se à conjuntos como o apresentado na Tabela 4.3, que exemplifica o cálculo do período de 17:45 a 18:45 na junção das ruas Benjamin Constant e João Cândido.

Tabela 4.3: Probabilidades de conversão

| R.Benjamin Constant (O-L) | | | | R.Prof. João Candido (S-N) | | | |
|---------------------------|--------|----------|--------|----------------------------|--------|---------|--------|
| Fluxo Direto | | Esquerda | | Fluxo Direto | | Direita | |
| Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus | Passeio | Ônibus |
| 75,15% | 80,30% | 24,85% | 19,70% | 86,12% | 4,70% | 13,88% | 95,30% |

No JTRROUTER estas informações são representadas através de arquivos XML contendo os dados sobre as probabilidades de conversão em cada junção e a cada intervalo da simulação. O código abaixo exemplifica a definição das probabilidades de conversão do fluxo de veículos de passeio com origem na R. Benjamin Constant (*edge benjaminConstant-1*), ao chegar na junção com a R. Prof. João Cândido. O fluxo direto tem como via de destino o *edge benjaminConstant-2* e o fluxo de conversão à esquerda tem como via de destino o *edge joaoCandido-8* nos primeiros 3600 segundos da simulação.

```
<turn-defs>
  <interval begin="0" end="3600">
    <fromedge id="benjaminConstant-1">
      <toedge id="benjaminConstant-2" probability="0.7515"/>
      <toedge id="joaoCandido-8" probability="0.2485"/>
    </fromedge>
  </interval>
</turn-defs>
```

```

    </fromedge>
  </interval>
</turn-defs>

```

A definição dos fluxos também é representada em arquivos XML, contendo dados sobre os tipos de veículos, definido assim a repartição modal, e os fluxos propriamente ditos. Como a simulação levará em conta probabilidades de conversão, não é necessário a especificação do parâmetro de destino dos fluxos, uma vez que estes destinos serão computados no processamento da simulação. O trecho abaixo exemplifica a representação de um fluxo codificado no arquivo XML.

```

<flows>
  <interval begin="0" end="3600">
    <flow id="0" from="joaoCandido-1" to="joaoCandido-8" no="144" />
  </interval>
</flows>

```

4.2.3 Simulação dos cenários avaliados

O microssimulador utilizado para executar as simulações foi o SUMO - *Simulation of Urban MObility*. O SUMO é um microssimulador de tráfego em software livre, de tempo contínuo (*space-continuous*) que trabalha com eventos discretos. O sistema é desenvolvido pelo *Institute of Transportation Research* do *German Aerospace Centre* (KRAJZEWICZ et al., 2002a). Toda sua concepção foi direcionada para a simulação de redes de tráfego do tamanho de uma cidade.

O desenvolvimento do SUMO - *Simulation of Urban MObility* iniciou-se no ano 2000, com o objetivo principal de disponibilizar à comunidade de pesquisa em gerenciamento de tráfego uma solução de microssimulação em software livre que permitisse a implementação de seus próprios algoritmos, sem a necessidade de se preocuparem em desenvolver uma solução completa de microssimulação (KRAJZEWICZ et al., 2002a).

O modelo de simulação *car-following* usado no SUMO é uma extensão do modelo de Gipps (GIPPS, 1986) resultante do trabalho de (KRAUSS, 1998). Este modelo é capaz de descrever tanto situações de tráfego livre quanto congestionado. A cada passo no tempo da simulação a velocidade do veículo é adaptada à velocidade do veículo-líder de modo a tornar o sistema livre de colisões no decorrer do próximo passo. Esta velocidade é chamada de v_{safe} e é calculada usando a equação:

$$v_{safe}(t) = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)\tau}{\frac{\bar{v}}{b(\bar{v})} + \tau} \quad (4.1)$$

- $v_l(t)$: velocidade do veículo-líder no tempo t
 $g(t)$: *gap* (brecha) para o veículo-líder no tempo t
 τ : tempo de reação do motorista (geralmente 1s)
 b : função de desaceleração

Para conciliar a aceleração com os limites físicos dos veículos, a velocidade *desejada* v_{des} é computada como o mínimo da função entre a velocidade máxima possível, a velocidade do veículo somada à máxima aceleração e a velocidade segura v_{safe} definida na equação 4.1. Deste modo um veículo não irá trafegar nem acelerar mais do que seja possível:

$$v_{des}(t) = \min [v_{safe}(t), v(t) + a, v_{max}] \quad (4.2)$$

Continuando, o motorista é simulado assumindo-se que ele é passível de erros e pode não se adaptar perfeitamente ao comportamento de velocidade desejada. Este aspecto é levado à simulação através da subtração de um fator aleatório *erro humano* da velocidade desejada.

$$v(t) = \max [0, rand [v_{des}(t) - \epsilon a, v_{des}(t)]] \quad (4.3)$$

Como o veículo não deve andar para trás, novamente - após os cálculos anteriores - o máximo da velocidade calculada e zero deve ser avaliado e este será o valor da velocidade final do veículo para o passo corrente. Uma avaliação completa e detalhada de todos os componentes, cálculos e hipóteses envolvidas neste modelo podem ser encontradas em (KRAUSS, 1998).

4.2.4 Calibração e validação do modelo

A confiabilidade de um ambiente de simulação está diretamente ligada à sua capacidade de produzir resultados próximos da realidade, porém, como muitas das variáveis e parâmetros de entrada são de difícil medição em campo ou às vezes simplesmente impossíveis de serem obtidas, o desempenho do modelo é substancialmente afetado nos casos de simulação de sistemas de trânsito.

A calibração é o processo de ajustar os dados e parâmetros de entrada disponíveis de modo a alcançar a melhor equivalência entre os resultados da simulação e os verificados no mundo real. Este processo é realizado de forma iterativa, onde os parâmetros são ajustados até que o modelo gere resultados equivalentes, ou próximos o suficiente, dos dados obtidos nas observações de campo. É importante salientar que, além da mera análise dos dados quantitativos, a fase de calibração exige um alto nível de conhecimento sobre o comportamento do tráfego avaliado (LIND et al.,).

Um estudo sobre a calibração e a validação de modelos e os métodos de como obter tais dados usando o SUMO é descrito em (KRAJZEWICZ et al., 2002b). A calibração é baseada na comparação entre os dados captados por detectores reais instalados em uma via e compará-los à saída gerada por detectores virtuais posicionados nas mesmas posições no ambiente simulado. Após cada simulação, os parâmetros do modelo eram refinados e a simulação reiniciada. A função de erro a ser minimizada é demonstrada pela equação 4.4.

$$e(p) = \frac{\langle |T_{sim}(p) - T_{obs}| \rangle}{\langle T_{obs} \rangle} \quad (4.4)$$

$T_{sim}(p)$: tempo de viagem simulado

$T_{obs}(p)$: tempo de viagem observado

Existem vários trabalhos na literatura que propõem outros métodos de calibração e validação, como o demonstrado em (HOURDAKIS; MICHALOPOULOS; KOTTOMMANNIL, 2003), porém o modelo descrito em (KRAJZEWICZ et al., 2002b) foi utilizado por ter sido desenvolvido especificamente para o SUMO e devido à disponibilidade dados necessários como entrada no processo. Após o processo de calibração, a relação entre os dados simulados e os dados reais coletados em campo ficou dentro do intervalo de 15% de taxa de erro amplamente aceito na literatura pesquisada. Os parâmetros de entrada modificados no processo de calibração foram: as velocidades máximas dos veículos, as taxas de aceleração e desaceleração e o fator *erro humano*, que modifica a agressividade dos motoristas na escolha de trocas de faixa e operações de aceleração e desaceleração, bem como o respeito aos tempos de amarelo dos semáforos.

4.2.5 Documentação e análise dos resultados

Para se poder avaliar os cenários propostos, algumas variáveis de tráfego foram estabelecidas como parâmetros de análise, com o propósito de caracterizar o de-

sempenho global da rede ante a implementação destes cenários, demonstrando-se com isso qual das alternativas é a mais indicada. A escolha destas variáveis foi estabelecida devido, principalmente, à sua representatividade na avaliação do desempenho global da rede. As variáveis escolhidas foram o **tempo médio de viagem**, representando o tempo médio gasto pelos veículos ao percorrerem o trecho estudado, a **velocidade média de viagem**, representando a velocidade média alcançada pelos veículos no trecho estudado e o **número de paradas**, representando o número médio de paradas realizadas pelos veículos no trecho estudado.

A Tabela 4.4 apresenta os resultados obtidos na simulação dos cenários, para cada uma das variáveis estabelecidas como parâmetros de análise:

Tabela 4.4: Resultados dos cenários simulados

| | Cenários | | | | | |
|-----------------------------------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | | 2 | | 3 | |
| | Carros | Ônibus | Carros | Ônibus | Carros | Ônibus |
| Tempo médio de viagem (s) | 168 | 237 | 177 | 246 | 190 | 273 |
| Velocidade média de viagem (km/h) | 23,3 | 14,21 | 21,54 | 13,33 | 19,6 | 12,98 |
| Número médio de paradas | 3 | 5 | 2 | 4 | 2 | 4 |

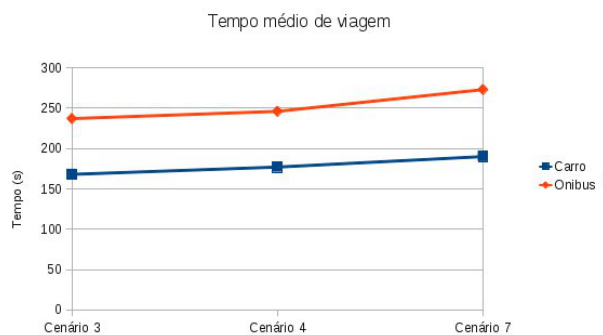


Figura 4.6: Tempos médios de viagem

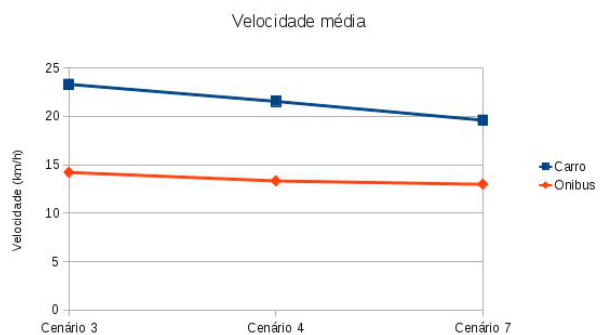


Figura 4.7: Velocidade média de viagem

Com base nas análises realizadas, chega-se a uma conclusão semelhante à apresentada em (GODOY, 2010), onde o cenário 1 obteve o melhor desempenho global dentre as alternativas propostas. Neste cenário, tanto as velocidades

médias obtidas pelos carros e os ônibus, quanto os tempos médios de viagem são melhores, considerando os parâmetros utilizados. Devido ao tempo de ciclo menor (45s), observa-se um maior número de paradas para os ônibus, fato este que também havia sido observado no estudo anterior. No cenário 2, onde o tempo de ciclo é de 60s, observa-se um número médio de paradas menor, porém com um aumento no tempo de viagem da ordem de 5,3% para os carros e de 3,8% para os ônibus. Conseqüentemente ocorre também uma diminuição na velocidade média, com uma diminuição de 7,5% para os carros e de 6,2% para os ônibus. O cenário 3, com tempo de ciclo de 75s, também oferece um número de paradas inferior ao cenário 1, porém os outros indicadores têm uma significativa piora.

5 Conclusões e Trabalhos Futuros

O presente trabalho teve como objetivo geral a identificação, organização e demonstração da utilização de soluções em software livre para validar algoritmos de otimização de tráfego veicular urbano e a microssimulação de modelos de redes viárias urbanas. A busca por estas ferramentas se justifica pela ausência de soluções disseminadas com estas características, agregando as vantagens da utilização de software livre com as vantagens proporcionadas pelo uso de ambientes de microssimulação pelos setores de gerenciamento da malha viária. O produto gerado a partir desta pesquisa pode auxiliar aos tomadores de decisão de órgãos e entidades ligadas ao tráfego urbano na realização de tarefas, como, por exemplo, o planejamento, avaliação de viabilidade e conseqüências na construção e alteração de vias de tráfego e a visualização dos efeitos causados por situações emergenciais (acidentes, obras, etc.).

Para alcançar estes objetivos foi realizado, primeiramente, um estudo sobre os conceitos principais de simulação de tráfego urbano e as ferramentas comerciais existentes e a sua aplicabilidade. A partir destes estudos, foram escolhidas alternativas em software livre já disponíveis e maduras que, funcionando em conjunto, formassem uma solução única e coesa para o atendimento das necessidades levantadas. O microssimulador SUMO (Simulation of Urban Mobility) foi a solução que atendeu de maneira mais abrangente todos os requisitos. Após a definição do microssimulador, foram elencadas outras ferramentas complementares que, integradas ao microssimulador, formam a solução completa para a criação do ambiente de microssimulação utilizando soluções em software livre, sendo:

- **OpenStreetMap** para a obtenção de dados geográficos
- **JOSM** para a eventual correção de detalhamento dos dados geográficos obtidos
- **eWorld** para a geração de cenários de simulação

- **TrafficModeler** para a geração de rotas

Para a validação da solução foram realizados experimentos integrando estas soluções e aplicando-as na complementação de um estudo na implantação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina-PR. Os resultados obtidos comprovaram a interoperabilidade de todas as soluções e comprovam a viabilidade do ambiente de microssimulação utilizando soluções em software livre. Além desta contribuição, no espírito do desenvolvimento de soluções em software livre, este estudo contribuiu com a comunidade tendo como resultados diretos:

- Atualização e correção dos dados dos mapas da região estudada da malha central da cidade de Londrina, no projeto OpenStreetMap, incluindo a nova conformação das vias com a adição das novas faixas de tráfego, localização das junções semaforizadas e detalhamentos, tais como a posição de redutores de velocidade e restrições de conversão.
- Aplicação de uma correção no software TrafficModeller para a importação de malhas geradas pela versão 0.12.0 do SUMO

Os resultados obtidos através das simulações validam as conclusões obtidas no estudo de (GODOY, 2010), onde o cenário que corresponde à otimização das duas faixas de fluxo geral de veículos e a adição de uma faixa exclusiva para ônibus, proporciona uma melhor circulação na sub-rede da malha estudada.

Como em qualquer simulação, cabe salientar que para a realização das análises apresentadas neste trabalho não foram utilizados alguns parâmetros que podem alterar sobremaneira os resultados finais. Dentre estes parâmetros podemos citar o fluxo de táxis e motocicletas, as localizações e tempos de paradas dos ônibus e informações relativas às velocidades médias dos fluxos. Estes dados não foram utilizados por não estarem disponíveis nas contagens oficiais ou levantamentos de campo realizados no decorrer do estudo. O processo de calibração do modelo também poderia ser melhorado com a introdução destas variáveis.

Como sugestões de trabalhos futuros, podemos elencar:

- Atualização e correção dos dados dos mapas de toda a malha disponível da cidade de Londrina, no projeto OpenStreetMap.
- A integração de algoritmos de controle semafórico, tais como o ATEFI e ATESA, no ambiente do SUMO, via o TraCI, permitindo assim a simulação

e visualização da aplicabilidade de um planejamento semaforico mais completo para malhas urbanas

- A criação de uma meta-solução com o objetivo de automatizar a integração entre as diferentes soluções que formam o ambiente proposto, integrando mais ainda as funcionalidades e facilitando ainda mais o seu uso
- A tradução e integração da documentação das diferentes soluções que formam o ambiente proposto
- A aplicação do ambiente proposto na avaliação de toda a malha viária central da cidade de Londrina-PR, permitindo a visualização integrada das conseqüências da implantação dos diferentes cenários
- A coleta e utilização de um número maior de parâmetros no processo de calibração do microssimulador, com a utilização de técnicas mais precisas para tal.

Por fim, como fruto do presente estudo, foi gerado um artigo científico apresentado no Congresso Brasileiro de Automática (CBA2012).

5.1 Agradecimentos

O autor deste trabalho agradece ao IPPUL (Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Londrina - Diretoria de Trânsito Viário) e à CMTU (Companhia Municipal de Transporte Urbano de Londrina) pelo suporte e disponibilização das informações utilizadas nesta pesquisa.

Referências

ADAMS, W. Road traffic considered as a random series. *Journal of the Institute of Civil Engineers*, v. 4, n. 1, p. 121–130, 1936.

AERDE, M. V.; HELLINGA, B.; BAKER, M.; RAKHA, H. INTEGRATION: An overview of traffic simulation features. *Transportation Research Records*, Citeseer, 1996.

AIMSUN. *AIMSUN 6.1.2*. June 2010. [Http://www.aimsun.com/site/](http://www.aimsun.com/site/). Disponível em: <<http://www.aimsun.com/site/>>.

BECK, M.; ENDERLEIN, S.; HELMICH, M.; HOLZ, C.; HUXOL, F.; NAUNMANN, N.; RIECK, D.; SCHäUFELE, B.; TRüMPER, J.; WOLF, M.; GERICKE, L.; KLEINE, M.; TöPPER, G.; MASCHKE, P. *eWorld User Manual*. [S.l.].

BOXILL, S.; YU, L. An evaluation of traffic simulation models for supporting its development. *Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University*, 2000.

CARDOSO, C. E. P. *Análise do Transporte Coletivo Urbano sob a Ótica dos Riscos e Carências Sociais*. Tese (Doutorado) — Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2007.

CERVANTES, S.; PIAI, J.; RAMÍREZ, E.; VARASQUIM, L.; NAGAYAMA, E. ATEFI-Um algoritmo para controle semafórico em tempo fixo descentralizado. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, v. 30, n. 1, p. 41, 2009.

DIJKSTRA, E. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

DUTRA, C. *Avaliação da eficiência de métodos de coordenação semafórica em vias arteriais*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2005.

EISSFELDT, N.; GRAFE, J.; WAGNER, P. *Simulating Traffic with Queueing Models*. [S.l.]: Citeseer, 2003.

FALCÃO, J.; JR, T. F.; LEMOS, R.; MARANHÃO, J.; SOUZA, P. D.; AFFONSO, C.; SENNA, E. Estudo sobre o software livre comissionado pelo Instituto Nacional da Tecnologia da Informação (ITI). 2009. Disponível em: <<http://virtualbib.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/2673/FGV-CTS>>

FERRER, J.; BARCELÓ, J. AIMSUN2: Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and non-urban Networks. 1993.

GARCIA, M.; BRESSAN, M.; SILVA, D. Um estudo sobre as opiniões de consumidores não especializados, no município de

- São Paulo, acerca da utilização do software livre e do software proprietário. *Revista Eletronica de Ciencia Administrativa-RECADM*, v. 8, n. 2, p. 119, 2010. ISSN 1677-7387. Disponível em: <<http://revistas.facecla.com.br/index.php/recadm/article/download/568/455>>.
- GIPPS, P. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 20, n. 5, p. 403–414, 1986.
- GODOY, W. F. *Aplicação da ferramenta TRANSYT na otimização e implantação de corredores exclusivos para ônibus na cidade de Londrina*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, 2010.
- GREENSHIELDS, B. A study in highway capacity. In: *Highway Research Board Proceedings*. [S.l.: s.n.], 1935. v. 14, n. 1, p. 448–477.
- HAKLAY, M. How good is volunteered geographical information? A comparative study of OpenStreetMap and Ordnance Survey datasets. *Environment and Planning B: Planning and Design*, Pion Ltd, London, v. 37, n. 4, p. 682–703, 2010.
- HAKLAY, M.; WEBER, P. OpenStreetMap: user-generated street maps. *IEEE Pervasive Computing*, IEEE Computer Society, p. 12–18, 2008.
- HOURDAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P. G.; KOTTOMMANNIL, J. Practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, Trans Res Board, v. 1852, n. -1, p. 130–139, 2003. ISSN 0361-1981.
- KRAJZEWICZ, D.; HERTKORN, G.; RUSSEL, C.; WAGNER, P. Sumo (simulation of urban mobility) - an open-source traffic simulation. 2002. Disponível em: <<http://elib.dlr.de/6661/>>.
- KRAJZEWICZ, D.; HERTKORN, G.; WAGNER, P.; ROSSEL, C. An example of microscopic car models validation using the open source traffic simulation sumo. In: CITESEER. *Proceedings of Simulation in Industry, 14th European Simulation Symposium*. [S.l.], 2002. p. 318–322.
- KRAUSS, S. Microscopic modeling of traffic flow: Investigation of collision free vehicle dynamics. 1998.
- LEUTZBACH, W.; BUSCH, F. Spurwechselforg
"ange auf dreispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. *Institut f ur Verkehrswesen, Universit at Karlsruhe*, 1984.
- LIEBERMAN, E.; RATHI, A. K. *Traffic Flow Theory: A State of the Art Report*. [S.l.], 1999. Disponível em: <<http://www.tfrc.gov/its/tft/tft.htm>>.
- LIND, G.; SCHMIDT, K.; ANDERSSON, H.; ALGERS, S.; CANEPARI, G.; TARANTO, C. D.; BERNAUER, E.; BRÉHERET, L.; GABARD, J.; FOX, K. *Best Practice Manual*. [S.l.]: Citeseer.
- LIU, R. DRACULA microscopic traffic simulator. Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1994.
- MAY, A. *Traffic flow fundamentals*. [S.l.]: Prentice Hall, 1990.

- NETO, T. *Desenvolvimento de um SIG de código aberto para simulação microscópica de tráfego urbano*. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Março 2009.
- OWEN, B.; BROCK, G.; MASTERBROOK, P.; PAVLIK, R.; RAO, S.; STALLARD, C.; SUNKARI, Z.; ZHANG, Y. A compendium of Traffic Model Validation Documentation and Recommendations: Phase I, Tasks AH. *USA: Department of Transportation*, 1996.
- PAPALEONTIOU, L.; DIKAIKAKOS, M. Trafficmodeler: A graphical tool for programming microscopic traffic simulators through high-level abstractions. In: CITESEER. *Proceedings of the IEEE 69th Vehicular Technical Conference (VTC2009-Spring)*. [S.l.], 2009.
- PORTUGAL, L. *Simulação de Tráfego: Conceitos e técnicas de modelagem*. [S.l.: s.n.], 2005.
- ROBERTSON, D. *TRANSYT. TRAFFIC NETWORK STUDY TOOL*. [S.l.], 1968.
- ROBERTSON, D. Cyclic flow profiles. *Traffic Engineering and Control*, v. 15, p. 640–641, 1974.
- SHANNON, R. *Systems simulation: the art and science*. [S.l.]: Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 1975.
- SPARMANN, U. Spurwechselforgänge auf zweispurigen BAB-Richtungsfahrbahnen. *Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik*, v. 263, p. 1978, 1978.
- THOMAS, G.; HOWARD, S.; BAFFOUR, K. *Linkage of Microsimulation Models with UTMIC*. October 2006.
- TIMMS, P.; WATLING, D.; LIU, R. *A Calibration manual for DRACULA*. 1997.
- TSIS-CORSIM. *TSIS-CORSIM - Traffic Software Integrated System - Corridor Simulation*. February 2010. [Http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/](http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/). Disponível em: <<http://mctrans.ce.ufl.edu/featured/tsis/>>.
- WEILAND, R.; PURSER, L. Intelligent transportation systems. *Transportation Research*, v. 1, 2000.