



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA

WALID ABDALA RFAEI JRADI

**Uma Arquitetura de Software  
Interativo para Apoio à Decisão na  
Modelagem e Análise do Tráfego  
Urbano**

Goiânia  
2008

WALID ABDALA RFAEI JRADI

# Uma Arquitetura de Software Interativo para Apoio à Decisão na Modelagem e Análise do Tráfego Urbano

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Computação.

**Área de concentração:** Visualização de Informações e Otimização Interativa.

**Orientador:** Prof. Dr. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento

**Co-Orientador:** Prof. Dr. Bryon Richard Hall

Goiânia  
2008

WALID ABDALA RFAEI JRADI

# **Uma Arquitetura de Software Interativo para Apoio à Decisão na Modelagem e Análise do Tráfego Urbano**

Dissertação defendida no Programa de Pós-Graduação do Instituto de Informática da Universidade Federal de Goiás como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Computação, aprovada em 23 de Setembro de 2008, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

---

**Prof. Dr. Hugo Alexandre Dantas do Nascimento**

Instituto de Informática – UFG

Presidente da Banca

---

**Prof. Dr. Bryon Richard Hall**

Instituto de Matemática – UFG

---

**Prof. Dr. Dario José Aloise**

Departamento de Informática e Matemática Aplicada – UFRN

---

**Prof. Dr. Juliano Lopes de Oliveira**

Instituto de Informática – UFG

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

**Walid Abdala Rfaei Jradi**

Graduou-se em Processamento de Dados pela UNIP - Universidade Paulista (Faculdades Objetivo). Durante sua graduação, desenvolveu um estudo sobre modelagem e simulação de redes coletoras de esgoto sanitário e de águas pluviais. Desenvolveu também um sistema de otimização de entrega e busca de mercadorias de uma madeireira. Durante o mestrado, participou do grupo de fundamentos de computação, realizando suas pesquisas no Laboratório de Visualização de Informações e Otimização Interativa, do Instituto de Informática da UFG.

À minha família. Sem eles eu sequer estaria vivo.

---

## Agradecimentos

---

A Deus, pelo dom da vida, e por ter-me permitido continuar nessa jornada.

À minha família. O apoio incondicional de meus pais, do Tárek e da Hanan foi o pilar desta conquista, além de ser a luz que me direciona em segurança nos meus dias mais sombrios.

Ao professor Hugo, orientador do presente trabalho. O fato de ter acreditado que eu seria capaz de concluir este projeto, até mesmo quando eu duvidava, revela uma nobreza de espírito difícil de ser encontrada.

Ao meu co-orientador, professor Bryon. Pela paciência e boa vontade em sanar todas as minhas dúvidas, até mesmo as aparentemente sem razão de ser. Estes dois últimos anos de convivência sem dúvida tornaram-me um profissional melhor do que era antes de conhecê-lo.

Aos colegas de mestrado, que sempre mostraram-se solícitos em ajudar-me a superar minhas limitações físicas. André, Charles, Daniel, Fernando, Halley, Jesmmer, Jesus, Lucas, Marcelo, Rafael, Rodrigo, Rogério, Rommel. A todos minha sincera gratidão.

À Luciana Nishi. Sempre preocupada com meu bem-estar, ela me tratava melhor do que eu mesmo me julgava merecedor. Seu lugar no céu está garantido, Luciana.

Ao Humberto Longo, que estendeu sua mão em um momento crucial do trabalho. Não canso de repetir: um dia ainda chegarei ao seu nível, professor.

Ao Dennysson. Apesar de não trabalhar mais comigo, esteve presente durante os primeiros dois anos desta caminhada.

E ao Fabrizzio. Sem o seu incentivo eu sequer teria iniciado esta aventura.

A todos, o meu mais franco “Muito Obrigado”.

Bem-aventurados aqueles que sonham, e estão dispostos a pagar o preço de tornar seus sonhos realidade.

**Cardeal Leon Joseph Suenens,**

---

## Resumo

---

Jradi, Walid Abdala Rfaei. **Uma Arquitetura de Software Interativo para Apoio à Decisão na Modelagem e Análise do Tráfego Urbano**. Goiânia, 2008. 92p. Dissertação de Mestrado. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

O presente trabalho propõe uma arquitetura de Sistema de Apoio à Decisão para modelar, simular e visualizar o tráfego urbano, usando um modelo matemático adequado à realidade do trânsito brasileiro, bem como uma modelagem de dados apropriada a esse contexto. Para comprovar a viabilidade da arquitetura, foi implementado uma ferramenta interativa, chamada PET-Gyn, com interface gráfica para a *Web*. A simulação do tráfego foi baseada em algoritmos existentes na literatura de comprovada eficácia, mas com adaptações que se mostraram necessárias. A modelagem de dados aplicada ao tráfego urbano é composta de informações retiradas da API do GoogleMaps, de dados sobre a malha viária e da coleta das demandas de tráfego medido em uma região da cidade de Goiânia-GO. A ferramenta permite a visualização de informações básicas sobre o tráfego em uma cidade e oferece formas de interação para simular o efeito de possíveis reestruturações da rede viária.

### Palavras-chave

Engenharia de Tráfego, Sistemas de Apoio à Decisão, Visualização de Informações, GoogleMaps, RIA.

---

## Abstract

---

Jradi, Walid Abdala Rfaei. **An Interactive Decision Support Software Architecture for Urban Traffic Modeling and Analysis..** Goiânia, 2008. 92p. MSc. Dissertation. Instituto de Informática, Universidade Federal de Goiás.

The present work proposes an architecture of a Decision Support System for modelling, simulating and visualizing urban traffic, using a mathematical model adjusted to the reality of the Brazilian transit, as well as an appropriate choice of data for this context. To prove the viability of the architecture, an interactive tool, called PET-Gyn, was implemented, with a Web graphical interface. The simulation of the traffic was based on algorithms already existing in the literature, with proven effectiveness, but with adaptations that had been shown necessary. The data applied to the urban traffic is composed of information obtained from GoogleMaps API, data on the road mesh and the collection of the traffic demands measured in a region of the city of Goiânia-GO. The tool allows the visualization of basic information about the traffic in a city and offers forms of interaction to simulate the effect of possible reorganizations of the road net.

### Keywords

Traffic Engineering, Decision Support Systems, Information Visualization, GoogleMaps, RIA.

---

# Sumário

---

Lista de Figuras	11
Lista de Tabelas	13
Lista de Algoritmos	15
<b>1</b> Introdução	<b>15</b>
1.1 Objetivos	17
1.2 Organização da Dissertação	17
<b>2</b> Revisão Bibliográfica	<b>19</b>
2.1 A Engenharia de Tráfego	19
2.1.1 Modelos para Simulação do Tráfego Urbano	20
Modelos Microscópicos	21
Modelos Mesoscópicos	21
Modelos Macroscópicos	21
2.1.2 Detalhes dos Modelos Macroscópicos de Alocação de Tráfego	22
Otimização do Usuário e Otimização do Sistema	22
2.1.3 Métodos para Determinação de Ponto de Equilíbrio em Rede de Transporte	25
Algoritmos para o Cálculo de Caminhos Mínimos	25
Métodos para o Quarto Passo do Algoritmo de Sheffi	30
2.2 Sistemas de Apoio à Decisão	32
2.2.1 DRACULA e SATURN	32
2.2.2 EMME2	33
2.3 Conceitos Básicos Sobre Visualização de Informações	34
2.3.1 Exemplos de Técnicas de Visualização	35
Coordenadas Paralelas	35
Foco e Contexto	36
Overview e Detail	36
2.3.2 Importância da Efetividade e Expressividade	36
2.3.3 Visualizações na Simulação do Tráfego	38
2.4 Interfaces Ricas para a Web	40
<b>3</b> A Arquitetura de Software para Análise e Simulação de Tráfego	<b>42</b>
3.1 Requisitos da Arquitetura	42
3.2 Elementos e Funcionalidades da Arquitetura	43
3.2.1 Projetos	44
3.3 Módulo de Simulação	45
3.3.1 Modelagem Matemática	46

Definições Básicas	46
Os Tipos de Arco e suas Funções $t_a$	47
Arcos Livres	50
O Algoritmo de Otimização	52
3.4 Módulo de Armazenamento e Recuperação de Dados	54
3.4.1 Possíveis SGBD para Utilizar	54
3.4.2 Base de Dados de Mapas	56
3.5 Módulo de Visualização	57
3.5.1 Protocolos de Comunicação	57
<b>4 O Sistema PET-Gyn</b>	<b>60</b>
4.1 Linguagens e Tecnologias Utilizadas para Implementação	60
4.2 Fluxo Principal de Dados	62
4.3 Detalhes de implementação dos algoritmos de modelagem e simulação	63
4.3.1 Sobre Arcos Incidentes em Rotatória	63
4.4 Interface com o Usuário	65
4.4.1 Barra de Ferramentas	65
4.4.2 Visão de Tabelas	67
4.4.3 Visão de Mapa	67
Representação Visual das Avenidas	69
Representação Visual de Intersecções de Avenidas	70
4.5 Exemplo de Uso	71
4.5.1 Criação de um Projeto	71
4.5.2 Executando a Simulação e Analisando Resultados	74
4.5.3 Explorando Alternativas para a Rede Viária	76
4.5.4 Modelando a Emissão de Poluentes	77
<b>5 Avaliação do Trabalho</b>	<b>79</b>
5.1 Configuração da Avaliação	79
5.1.1 Escolha dos Avaliadores	79
5.1.2 Preparação e Realização das Avaliações	80
5.2 Resultados Obtidos	81
5.2.1 Primeira Avaliação	81
5.2.2 Segunda Avaliação	82
5.3 Comentários Gerais	83
5.3.1 Pontos importantes	84
<b>6 Conclusão</b>	<b>86</b>
6.1 Contribuições	87
6.2 Trabalhos Futuros	87
<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>88</b>

---

## Lista de Figuras

---

2.1	Caminhos mínimos em um grafo.	26
2.2	Método da razão dourada.	30
2.3	Busca de Fibonacci.	31
2.4	Processo de Construção de uma Visualização.	34
2.5	Duas versões de uma mesma imagem.	36
2.6	Alguns exemplos de visualizações.	37
2.7	Acuidade de percepção dos atributos visuais.	38
2.8	Algumas Visualizações do SATURN.	39
2.9	Simulação em Execução no VISSIM.	39
2.10	Simulação em Execução no Paramics Modeller V3.0.	39
2.11	Sequência tradicional de requisições de uma aplicação Web.	40
2.12	Seqüência de requisições de uma aplicação AJAX.	41
3.1	Módulos da Arquitetura.	44
3.2	Exemplo de fluxos em vias preferenciais.	49
3.3	Exemplo de conversão não permitida.	50
3.4	Grafo original representando ruas, cruzamentos e arcos livres.	51
3.5	Nós criados a partir dos arcos livres.	51
3.6	Arestas do novo grafo.	52
3.7	Vértice inicial "A".	52
3.8	Custo das arestas partindo de "A".	52
3.9	Exemplo de atribuição de fluxos pelos caminhos mínimos.	54
3.10	Modelo Entidade-Relacionameto das Entidades Componentes da Rede Viária.	55
3.11	Exemplo de uso do objeto XMLHttpRequest.	58
4.1	Fluxo principal de dados da simulação.	63
4.2	Exemplo de rotatória.	64
4.3	Descobrimo fluxos em rotatória.	65
4.4	Barra de Ferramentas do PET-Gyn.	66
4.5	Lista Detalhada dos Fluxos e Tempos.	67
4.6	Visão de Tabelas do Projeto.	68
4.7	Interface da Aplicação - Visão do Mapa.	69
4.8	PET-Gyn – Menu com as opções do mapa.	70
4.9	PET-Gyn – Menu com as opções do arco.	70
4.10	PET-Gyn – Janela de edição nós.	72
4.11	Exemplo de mapa com 44 nós inseridos.	72
4.12	PET-Gyn – Janela de edição de arcos.	73
4.13	Mapa com 107 arcos criados.	73

4.14	PET-Gyn – Janela de edição/criação de um arco livre.	74
4.15	PET-Gyn – Matriz de Demandas.	74
4.16	Resultado do Cálculo da Região A.	75
4.17	PET-Gyn – Menu de Visualizações.	75
4.18	PET-Gyn – Mapa com filtro ativado.	76
4.19	Comparação entre dois projetos.	77
4.20	Arcos com melhora nos tempos.	77

---

## Lista de Tabelas

---

2.1	Preços do SATURN	33
2.2	Preços do DRACULA	33

## Lista de Algoritmos

2.1	<i>FloydWarshall</i>	27
2.2	<i>Dijkstra</i>	28
2.3	<i>BellmanFord</i>	29

## Introdução

---

O trânsito nas grandes cidades brasileiras está, na maioria dos centros urbanos, em estado caótico. O fenômeno ocorre, principalmente, devido ao precário dimensionamento da malha viária em relação ao número de veículos que trafegam nas vias públicas. Ele é agravado também pelo constante aumento da necessidade de deslocamento por parte de pessoas e mercadorias, as quais são, em grande parte, oriundas de atividades de recreação, sociais e econômicas.

A recuperação da economia, que o país tem experimentado nos últimos anos, e a ampliação do crédito disponível à população desempenham um papel importante nesse problema. De acordo com a FENABRAVE [24], apenas no ano de 2007 foram emplacados 2.342.059 automóveis de passeio e veículos comerciais leves, estando fora desse número caminhões, ônibus e motocicletas. Isso dá uma média de 6.416 novos veículos/dia nos aglomerados urbanos. Neste mesmo ano, apenas o DETRAN da cidade de São Paulo licenciou 267,5 mil novos veículos [24].

Esse aumento constante, aliado à crônica ausência de políticas governamentais adequadas para o setor leva, inexoravelmente, à deterioração do espaço disponível na malha viária para a movimentação dos veículos, multiplicando os pontos de estrangulamento e o tempo necessário aos deslocamentos. O tempo perdido em congestionamentos e engarrafamentos resulta em prejuízos econômicos estimados na ordem de 450 milhões de reais/ano em apenas 10 cidades (Belo Horizonte, Brasília, Campinas, Curitiba, João Pessoa, Juiz de Fora, Porto Alegre, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo), segundo pesquisa do IPEA e da ANTP [37]: “*Caso as demais cidades médias e grandes brasileiras sejam incluídas, este valor sobe para a casa de vários bilhões de reais por ano, sem contar as perdas devidas aos acidentes de trânsito (que também se estima em vários bilhões de reais por ano)*”.

Outra nuance que vem sendo observada e que agrava ainda mais o problema de transporte é o do chamado “crescimento espalhado” das cidades: as áreas centrais perdem moradores e a periferia incha, à medida em que a população mais pobre busca por moradias mais baratas, enquanto as classes mais favorecidas buscam a segurança dos condomínios fechados [27]. Reportagem recente do jornal Folha de São Paulo [28]

informa que “o centro expandido de São Paulo, que reúne os bairros de maior poder aquisitivo, perdeu 441 mil habitantes de 1996 a 2007, enquanto as extremidades pobres ganharam 1,23 milhão”. Ainda segundo a matéria, “o fenômeno preocupa os urbanistas, ..., pois esse tipo de urbanização torna serviços como distribuição de água, coleta de lixo e transporte público mais complexos e caros. Há, ainda, ocupação de áreas de mananciais e *mais uso do carro*” (grifo do autor).

Existem também aspectos ambientais e de saúde que devem ser considerados. Veículos presos em engarrafamentos ou deslocando-se a pequenas velocidades, com os motores funcionando em baixa rotação, tendem a emitir mais gases poluentes, pois existe uma relação direta entre velocidade, consumo de combustível e emissão de agentes físicos que provocam degradação do meio ambiente [36]. As conseqüências da constante inalação de gases tóxicos pela população são amplamente conhecidos pela medicina [11]. Dados do Ministério da Saúde [52] revelam que, no ano 2000, foram internados 1.936.444 pacientes em hospitais da rede pública brasileira por problemas pulmonares, dos quais 275.769 (14,24%) no Estado de São Paulo.

As estimativas realizadas pelo IPEA e pela ANTP [37] revelam que a quantidade de combustíveis (gasolina, álcool, diesel, entre outros) desperdiçados anualmente pelos veículos parados em congestionamentos severos é de 251 milhões de litros para os automóveis e de 7 milhões de litros para os ônibus, com a conseqüente emissão extra de 122 mil toneladas de monóxido de carbono e 11 mil toneladas de hidrocarbonetos apenas pelos automóveis.

Aí estão apenas alguns motivos pelos quais torna-se de fundamental importância o estudo do trânsito urbano e a proposta de soluções que minimizem os transtornos e os prejuízos financeiros e à saúde causados por redes viárias incorretamente dimensionadas, papel este exercido pela Engenharia de Tráfego.

De acordo com o folheto “Traffic Engineering - What? Why? How?” [1], a Engenharia de Tráfego é a fase da engenharia que lida com o planejamento, desenho geométrico e operações de tráfego de estradas, ruas e auto-estradas, suas redes, terminais, terras fronteiriças e relacionamentos com outras formas de transporte buscando segurança, eficiência e movimentação conveniente de pessoas e mercadorias.

Ainda segundo o folheto, “*A Engenharia de Tráfego aplica princípios da engenharia para resolver problemas de transporte, usando também conhecimentos de psicologia e hábitos dos usuários dos sistemas de transporte.*” (traduções do autor).

Em suas atividades diárias, a Engenharia de Tráfego utiliza-se, entre outras ferramentas, de modelos matemáticos e simulações computadorizadas para tentar prever o comportamento dos motoristas e estimar os impactos de possíveis modificações na estrutura da malha viária.

Embora existam sistemas computacionais já desenvolvidos e comercialmente

disponíveis para este mister, alguns problemas impedem sua adoção de forma mais generalizada pelos órgãos interessados, entre eles: o custo elevado destes softwares (muitas vezes proibitivos para cidades de menor porte), a necessidade de treinamento dos usuários e manutenção dos sistemas e a inadequação dos modelos matemáticos utilizados para descrever as particularidades do trânsito brasileiro.

O presente trabalho visa, portanto, contribuir para solucionar esse problema, apresentando uma arquitetura de software DSS – Decision Support System, ou Sistema de Apoio à Decisão – que faz uso de um modelo matemático adequado à realidade do trânsito urbano brasileiro e uma modelagem de dados apropriada a esse contexto. Para comprovar a viabilidade da arquitetura proposta, foi implementado o software PET-Gyn, usando exclusivamente tecnologias livres, com interface gráfica para a *Web*.

A simulação do tráfego foi baseada em algoritmos existentes na literatura de comprovada eficácia, mas com adaptações que se mostraram necessárias. A modelagem de dados aplicada ao tráfego urbano, por sua vez, é composta de informações retiradas da API do GoogleMaps [31], de dados sobre a malha viária e da coleta das demandas de tráfego medido em uma região da cidade de Goiânia-GO. A ferramenta permite a visualização de informações básicas sobre o tráfego em uma cidade e oferece formas de interação para simular o efeito de possíveis reestruturações da rede viária.

## 1.1 Objetivos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- propor uma arquitetura de um sistema interativo de suporte à decisão para uso pela Engenharia de Tráfego;
- descrever uma modelagem matemática que simule adequadamente o comportamento do fluxo viário urbano;
- apresentar uma implementação concreta desta arquitetura, que permita trabalho colaborativo e remoto – com acesso via *Web* – e possua visualizações interativas;
- avaliar a possibilidade de utilização de tal ferramenta na modelagem e análise de condições reais do tráfego de Goiânia.

## 1.2 Organização da Dissertação

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: O Capítulo 2 fornece uma revisão bibliográfica dos conceitos básicos sobre modelagem de tráfego urbano, visualização de informações e os sistemas de modelagem de tráfego existentes.

O Capítulo 3 descreve a arquitetura proposta para um sistema de simulação de trânsito urbano. O Capítulo 4 apresenta o PET-Gyn e explica detalhes de sua implementação. O Capítulo 5 discute os resultados das avaliações da ferramenta implementada. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho e projetos futuros que podem ser realizados a partir do estado atual da pesquisa.

---

## Revisão Bibliográfica

---

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos necessários para a definição da arquitetura proposta. São descritos modelos matemáticos para a simulação dos fluxos de veículos, os objetivos dos sistemas de suporte à decisão, aspectos da área de visualização de informações e, por fim, as idéias que fundamentam as tecnologias de interfaces ricas para a Web.

### 2.1 A Engenharia de Tráfego

Segundo Cascetta [13], um *sistema de transporte* pode ser definido como uma combinação de elementos e suas interações, os quais produzem tanto as demandas pelas viagens quanto o fornecimento de serviços de transporte para satisfazer essas demandas. Tal definição é bastante genérica e pode ser aplicada em diferentes contextos. De um modo geral, a *Engenharia de Transportes* trata do desenho e da avaliação de projetos de sistemas de transporte.

A *Engenharia de Tráfego*, por sua vez, é uma especialização da engenharia de transportes, cujos objetivos são a planificação – na qual estabelecem-se as metas, etapas, prazos e meios –, o desenho geométrico das vias e a forma como irão relacionar-se com outros meios de transporte, e as operações de tráfego na malha viária. A Engenharia de Tráfego sempre deve ter como premissas básicas a garantia de uma movimentação segura, eficiente e conveniente de pessoas e bens, e custos aceitáveis [47].

O aspecto que singulariza a Engenharia de Tráfego e a diferencia das outras áreas da Engenharia é que ela trata de problemas que não dependem exclusivamente de agentes físicos, devendo, com frequência, considerar também os comportamentos de motoristas e pedestres e a forma como estes relacionam-se com o ambiente ao seu redor.

Embora possa parecer que o trabalho das autoridades responsáveis pelo tráfego seja simples - pois à primeira vista basta aumentar a capacidade da rede para melhorá-la - isto nem sempre é verdadeiro. Um famoso exemplo é dado pelo *Paradoxo de Braess*. Tal paradoxo afirma ser possível (embora pouco provável) que “*aumentar a capacidade da rede, criando-se um ligação direta entre dois caminhos iniciais (um terceiro caminho),*

possui o efeito de aumentar o tempo de percurso para **todos** os usuários do sistema” [26]. Ou seja, os tempos das viagens serão **maiores** do que antes da construção do novo caminho.

Este fenômeno nada óbvio pôde ser observado na prática nas cidades de Nova York (Estados Unidos) e Stuttgart (Alemanha). Em 1990, a 42<sup>a</sup> avenida da cidade de Nova York foi fechada para o *Earth Day* e, apesar das previsões de que isso geraria o caos, o trânsito da área na realidade melhorou [39]. O oposto ocorreu em Stuttgart: uma nova avenida foi construída no centro da cidade e o trânsito piorou sensivelmente. Os benefícios que eram esperados com sua construção só foram conseguidos depois que uma avenida que a cruzava foi fechada para o tráfego [10].

Feitas estas considerações, a Engenharia de Tráfego caracteriza-se como uma área de conhecimento multidisciplinar. Uma equipe completa, para pleno estudo da área, é composta idealmente de engenheiros civis, engenheiros de estruturas, engenheiros de tráfego, arquitetos, paisagistas, urbanistas, planejadores urbanos, sociólogos, geógrafos urbanos, economistas, matemáticos (matemática aplicada), advogados e analistas de mercado [18].

### 2.1.1 Modelos para Simulação do Tráfego Urbano

Segundo Ortúzar e Willumsen [20], um modelo pode ser entendido como uma representação simplificada de uma parte do mundo real, o qual procura focar certos elementos considerados importantes para análise, sob um determinado ponto de vista. Dessa forma, a modelagem do tráfego tenta descrever o comportamento do mesmo por meio de recursos comportamentais, computacionais e matemáticos, de forma a entender melhor seus problemas ou prever comportamentos futuros.

A modelagem de tráfego parte de uma hipótese que, apesar de imperfeita, serve na medida em que corresponde à maior parte do fluxo rodoviário, sobretudo em horários de pico. Supõe-se que todo motorista é familiar com a rede viária na qual transita e pretende minimizar o tempo ou custo de seu deslocamento. Também supõe-se que a demanda de deslocamento é fixa.

Pode ser encontrada na literatura uma grande variedade de modelos de tráfego que buscam reproduzir a realidade segundo diversas abordagens. Esses modelos, entretanto, acabam possuindo diversos pontos em comum, o que permite classificá-los sob alguns aspectos. Um desses aspectos consiste dos *níveis de representação dos fluxos viários* (também chamados de *níveis de agregação*), segundo os quais os modelos podem ser categorizados em modelos micro, meso ou macroscópicos [41, 19], conforme descritos a seguir.

### **Modelos Microscópicos**

Os modelos microscópicos simulam em detalhes os comportamentos individuais de cada veículo, tais como aceleração, frenagem, mudança de faixa, etc, bem como as conseqüências de cada ação individual em relação aos outros veículos. Eles funcionam de maneira estocástica (gerando aleatoriamente vários parâmetros da simulação) e exigem um grande esforço computacional e uma grande quantidade de dados [30, 41].

Apesar do alto custo do desenvolvimento dos modelos microscópicos e das suas dificuldades de manutenção e execução [41], existe uma quantidade considerável de aplicações acadêmicas e comerciais que os implementam, podendo ser citados o sistema AIMSUN2 e o sistema DRACULA. Uma lista abrangente desses softwares pode ser encontrada em [40].

Mais recentemente, têm sido realizados esforços para uma separação ainda maior dos elementos envolvidos no tráfego, considerando individualmente comportamentos de motoristas (com modelagens detalhadas de percepção, decisões tomadas e enganos cometidos) e veículos. Tal abordagem é chamada de nanoscópica [5].

### **Modelos Mesoscópicos**

São modelos determinísticos que descrevem as entidades do sistema com um elevado número de detalhes, mas tratam as suas atividades e interações (por exemplo, uma mudança de faixa) com muito menos precisão, quando comparados aos modelos microscópicos [41]. Em sua análise, tais modelos não consideram como elementos constituintes do tráfego os veículos individualmente, mas sim os pelotões que eles formam ao se deslocarem, em função das interrupções momentâneas nos fluxos geradas pelos semáforos. Os modelos mesoscópicos são bastante úteis, por exemplo, na definição de políticas de sincronização semafórica.

### **Modelos Macroscópicos**

Os modelos macroscópicos tratam o tráfego como uma entidade única na forma de um sistema em equilíbrio, descrevendo-o através de relações entre fluxos, densidade e velocidade [19]. Esses modelos geralmente representam as correntes de tráfego como um fluido contínuo que escoar de forma análoga aos líquidos, buscando nas leis da hidrodinâmica a formulação teórica que os sustentam [57, 49].

Os modelos macroscópicos são os menos custosos em termos computacionais e de implementação, porém são os mais imprecisos. Por causa dessa imprecisão, o seu uso é tradicionalmente justificado quando [30, 41]:

- o resultado do cálculo não é sensível a detalhes microscópicos;

- a escala da aplicação não permite a execução dos modelos microscópicos, devido ao alto tempo de execução; e
- os recursos e tempo disponíveis para a construção da aplicação são limitados.

Por outro lado, têm sido observado que as incertezas envolvidas no levantamento dos dados dos fluxos viários tornam desnecessária a preocupação com a exatidão na busca da solução ótima [4]. Isso tem feito com que os modelos macroscópicos cresçam em popularidade, a ponto de serem hoje largamente utilizados nas simulações do trânsito urbano. O presente trabalho opta, assim, pelo uso de um modelo macroscópico para a modelagem do tráfego.

### 2.1.2 Detalhes dos Modelos Macroscópicos de Alocação de Tráfego

Uma *rede viária* é uma representação simplificada de uma malha viária existente [48]. Para mensurar o comportamento dos veículos em uma rede viária, é necessário submetê-la à circulação de tráfego, sendo tal atividade chamada de *alocação do tráfego*. Neste processo, algumas suposições simplificadoras são feitas a respeito do tráfego rodoviário:

- a grande maioria dos motoristas parte de certa origem para um determinado destino;
- a grande maioria dos motoristas conhece bem a geografia do local e quais possíveis caminhos são os mais econômicos naquele momento<sup>1</sup>.

Os modelos macroscópicos para alocação têm como dados de entrada, além da estrutura da malha urbana, regras na seleção de rotas que dizem respeito ao problema em análise, bem como uma matriz de demandas que indica a quantidade de tráfego entre pares origem-destino [21]. Como dados de saída, esses modelos geram os fluxos médios de veículos nas vias e os tempos médios necessários para percorrê-las.

É apresentado a seguir como o processo de alocação do tráfego pode ser computado.

#### Otimização do Usuário e Otimização do Sistema

O objetivo da alocação do tráfego nos modelos macroscópicos (algumas vezes chamada de *atribuição estática de tráfego*) geralmente visa alcançar um dos seguintes estados de equilíbrio (ou de otimização) [32]:

---

<sup>1</sup>Essa suposição pode não ser inteiramente correta em alguns casos. No entanto, tal condição não chega a ser um elemento complicador da modelagem, pois é possível associar uma velocidade máxima livre um pouco menor do que a verdadeira para vias pouco conhecidas. Isto minimiza o uso dessas vias pelos algoritmos, simulando efetivamente o fato das mesmas não serem bem conhecidas.

- **Equilíbrio do Usuário (EU):** Nesse estado, o tráfego procura atender ao *Primeiro Princípio de Wardrop*. Tal princípio diz que, sob condições de equilíbrio, o tráfego se auto-organiza em redes congestionadas como se todas as rotas, entre quaisquer origens e destinos, tenham custos mínimos, enquanto todas as rotas não usadas possuam custos maiores do que as usadas. Os motoristas escolhem individualmente suas rotas mais rápidas, e o sistema entra em equilíbrio quando nenhum veículo consegue melhorar seu tempo de viagem através de uma mudança individual de percurso.
- **Otimização do Sistema (OS):** Wardrop também propôs uma forma alternativa de alocação de tráfego em uma rede de transporte, e que é conhecido como *Segundo Princípio de Wardrop*. Nesse estado, o sistema viário é organizado de tal forma que a soma dos tempos de viagem de todos os motoristas seja a menor possível.

O estado EU procura reproduzir o comportamento real dos motoristas no trânsito. Já o estado OS representa um comportamento ideal, em que o sistema do trânsito é otimizado globalmente, algumas vezes em detrimento de interesses de motoristas individuais. Os Problemas de Equilíbrio de Tráfego (PET) que focam nos estados EU e OS são chamados, respectivamente, de PET-EU e PET-OS. A comparação das soluções para os PET-EU e PET-OS indica o nível de ineficiência intrínseca da rede viária atual, sendo também uma estimativa do impacto das decisões individuais desses motoristas em relação ao sistema como um todo.

Beckmann et al. [7], foram os primeiros a apresentar uma modelagem matemática para computar tanto o PET-EU quanto o PET-OS. Nesta modelagem, o ponto central é a formulação de uma função de latência para cada avenida do sistema viário de tal forma que, quanto mais motoristas usarem-na, maior será a sua latência, tornando-a cada vez menos atrativa e obrigando os usuários a escolherem rotas alternativas [15]. Essa função deve ser convexa, contínua, crescente e positiva. No presente trabalho, a função de latência para cada arco (avenida)  $a$  é o custo do arco (ou tempo médio),  $t_a$ .

No modelo proposto por Beckmann et al. é assumido que o tempo necessário para percorrer cada arco  $a \in E$  depende apenas do fluxo nele próprio. Porém, quando se consideram arcos cujo tempos para atravessá-los sofrem influência de outros arcos (como, por exemplo, avenidas não-preferenciais, onde os motoristas devem esperar a vez antes de continuar a viagem) esta suposição não reflete a realidade. Outros fatores, além do fluxo no próprio arco, geralmente têm influência decisiva no tempo de percurso no arco<sup>2</sup>.

A modelagem matemática de Beckmann et al. considera o PET-OS como um problema de minimização, definido da seguinte forma:

---

<sup>2</sup>Esses fatores são detalhados na Seção 3.3.1.

$$\begin{aligned}
& \min_x && \sum_{a \in E} x_a t_a \\
\text{sujeito a} &&& \mathbf{x} = \Lambda \mathbf{f} \\
&&& \mathbf{d} = D \mathbf{f} \\
&&& \mathbf{f} \geq 0
\end{aligned}$$

onde  $t_a$  é a função que expressa o tempo de percorrer o arco  $a$ , em função de suas características físicas e do fluxo.  $\sum_{a \in E} x_a t_a$  é o tempo total de fluxo em veículos-segundos, sendo  $x_a$  o fluxo no arco  $a$ , agrupado no vetor  $x$  e  $t_a$  uma função convexa, contínua, não-negativa e não-decrescente. O vetor  $f$  contém os fluxos no total de  $k$  caminhos entre os nós de origem e destino,  $d$  é o vetor, presumidamente conhecido, de demanda entre os nós de origem e os de destino e as matrizes  $\Lambda$  e  $D$  relacionam os arcos aos caminhos e a demanda para um certo par O-D (origem-destino) aos caminhos entre estes nós. Um fluxo  $f$  em caminhos ou  $x$  em arcos é considerado viável se a demanda  $d$  é atendida.

O PET-OS é o fluxo ideal, com minimização de consumo de combustível e de total de tempo de viagem, apesar de normalmente implicar em desvantagem para certos motoristas individuais.

Sendo  $T_k = \sum_{a \in k} t_a$  a soma dos tempos nos arcos de um caminho  $k$ , ou seja, o tempo total de trânsito de certa origem para destino, o princípio de Wardrop pode ser expresso por  $T_k(f^*)(f - f^*) \geq 0$  para todo fluxo viável  $f$  do par OD  $k$ , mas é mais conveniente converter esta desigualdade em outra que pode ser usada no algoritmo, a saber  $T(X^*)(X - X^*) \geq 0$  para todo fluxo viável  $X$ .

Pode-se demonstrar [7, 46] que esta condição corresponde às condições de otimalidade de um problema de otimização convexa, definido como PET-EU (Equilíbrio do Usuário) [15]:

$$\begin{aligned}
& \min_x && \sum_{a \in E} \int_0^{x_a} t_a(x_a) dx \\
\text{sujeito a} &&& \mathbf{x} = \Lambda \mathbf{f} \\
&&& \mathbf{d} = D \mathbf{f} \\
&&& \mathbf{f} \geq 0
\end{aligned}$$

### 2.1.3 Métodos para Determinação de Ponto de Equilíbrio em Rede de Transporte

Existem alguns algoritmos que procuram resolver os problemas acima segundo abordagens matemáticas diversas, podendo ser citados o método das combinações convexas e o do gradiente projetado, entre outros. Esses dois métodos usam idéias bastante distintas para modelar o equilíbrio da rede, e uma comparação detalhada entre eles pode ser encontrada em [17].

É descrito a seguir algoritmo de Sheffi, o qual faz uso do método das combinações convexas, sendo apresentado com mais detalhes na Seção 3.3.1. Os passos desse algoritmo são:

- Passo 1:  $i := 0$ . Encontre um fluxo  $x^0$  inicial viável.
- Passo 2: Calcule  $t_a^i(x_a^i)$ ,  $\forall a \in E$ .
- Passo 3: Com os tempos  $t_a^i$  obtidos, calcule e encontre o caminho de tempo mínimo (ver algoritmos na Seção 2.1.3) para cada demanda O-D. Um novo fluxo  $y_a^i$  para cada arco  $a$  é computado então como sendo a quantidade de veículos das demandas O-D que envolvem caminhos mínimos que passam por  $a$ .
- Passo 4: Encontre  $\alpha^i \in \mathbb{R}$  no intervalo  $[0,1]$  (ver algoritmos na Seção 2.1.3) que minimize a função:

$$\sum_{a=1}^{|E|} \int_0^{x_a^i + \alpha(y_a^i - x_a^i)} t_a^i(x_1^i, x_2^i, \dots, \omega, \dots, x_m^i) dx \quad \text{para o PET-EU ou}$$

$$\sum_{a=1}^{|E|} x_a^i * t_a^i(x_1^i, x_2^i, \dots, \omega, \dots, x_m^i) \quad \text{para o PET-OS}$$

- Passo 5: Faça  $x^{i+1} = x^i + \alpha^i(y^i - x^i)$
- Passo 6: Teste a convergência  $\epsilon$ . Se  $|x^{i+1} - x^i| < \epsilon$ , o algoritmo termina. Se não,  $i := i + 1$  e volta ao passo 2.

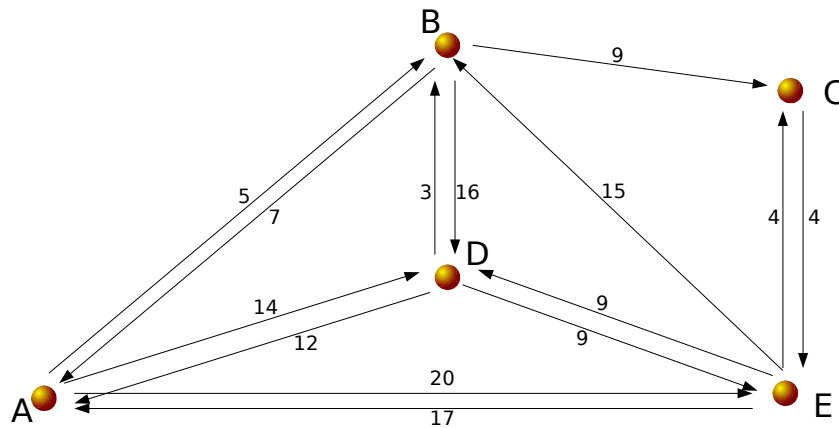
#### Algoritmos para o Cálculo de Caminhos Mínimos

Em Teoria dos Grafos, o problema de caminho mínimo consiste em minimizar o custo de travessia entre dois nós de um grafo valorado. O custo do caminho é dado pela soma dos custos das arestas percorridas [16].

Sob uma definição formal, um grafo valorado  $G$  consiste em um conjunto  $V$  de vértices, um conjunto  $E$  de arestas e uma função de custo  $w : A \rightarrow \mathbb{R}$ . Dado um vértice  $v$  qualquer de  $V$ , o algoritmo de busca de caminho mínimo encontra o trajeto  $p$  entre  $v$  e um outro  $v'$  tal que

$$w(p) = \sum_{i=1}^k w(v_{i-1}, v_i)$$

onde  $w(v_{i-1}, v_i)$  é o custo da aresta, seja mínimo entre  $v$  e  $v'$ .



**Figura 2.1:** O caminho mínimo entre A-E é A-B-C-E, com custo 18. Entre D-A, o menor caminho é D-B-A, cujo valor é igual a 10.

Entre os algoritmos para resolver o problema dos caminhos mínimos, podem ser citados:

- **Algoritmo A\*** – lê-se A-estrela. Esse algoritmo computa o menor caminho a partir de um vértice inicial usando um método heurístico [55];
- **Dijkstra** – encontra os menores caminhos partindo de um vértice fonte para todos os demais vértices, sendo que as arestas devem ter peso maior ou igual a zero [16]. O algoritmo de Dijkstra resolve o problema em tempo  $O((|V| + |E|)\log|V|)$ . Seu pseudo-código pode ser visto no Algoritmo 2.2.
- **Bellman-Ford** – resolve o problema de caminho mínimo similarmente ao algoritmo de Dijkstra, mas as arestas podem ter pesos negativos [16]. Sua complexidade é  $O(|V| \cdot |E|)$  e seu pseudo-código pode ser visto no Algoritmo 2.3.
- **Floyd-Warshall** – determina os menores caminhos entre todos os pares de vértices de um grafo genérico, mesmo aqueles que possuam arestas com peso negativo, porém o grafo não deve possuir nenhum ciclo de valor menor que zero. Seu tempo de execução é  $\Theta(|V|^3)$  [16] e o pseudo-código pode ser observado no Algoritmo 2.1, onde  $n$  indica a quantidade de vértices no grafo.
- **Johnson** – Tem o mesmo objetivo do algoritmo de Floyd-Warshall mas, para grafos esparsos, é assintoticamente mais rápido [16], pois executa em tempo  $O(|V|^2 \cdot \log|V| + |V| \cdot |E|)$ .

Segue abaixo o pseudo-código dos 3 algoritmos de caminhos mínimos que foram implementados no presente trabalho: Floyd-Warshall, Dijkstra e Bellman-Ford.

---

**Algoritmo 2.1:** *FloydWarshall(D)*

---

**Entrada:** Matriz quadrada  $n \times n$  ( $D$ ).

**Saída:** Matriz  $D$ , modificada para indicar o valor do menor caminho entre todos os pares de vértices e a matriz  $\pi$  de predecessores.

```

1 início
2   //Inicialização
3   para (i de 1 até n) faça
4     para (j de 1 até n) faça
5       se  $D[i,j] < \infty$  então
6          $\pi[i,j] \leftarrow i$ 
7       fim
8     fim
9   fim
10  //Descobre os caminhos mínimos
11  para (k de 1 até n) faça
12    para (i de 1 até n) faça
13      para (j de 1 até n) faça
14        se  $D[i,k] + D[k,j] < D[i,j]$  então
15           $D[i,j] \leftarrow D[i,k] + D[k,j]$ 
16           $\pi[i,j] \leftarrow \pi[k,j]$ 
17        fim
18      fim
19    fim
20  fim
21 fim

```

---

---

**Algoritmo 2.2:** *Dijkstra*( $V, A, s$ )

---

**Entrada:** Lista *Vértices*  $V$ , lista *Arestas*  $A$ , *Vértice Inicial*  $s$ .

**Saída:** Lista de distâncias  $d$  e lista de predecessores  $\pi$ .

```
1 início
2   //Inicialização
3   para cada vértice  $v \in V$  faça
4     |    $d[v] \leftarrow \infty$ ;
5     |    $\pi \leftarrow \text{nulo}$ ;
6   fim
7    $d[s] \leftarrow 0$ ;
8   //O conjunto  $S$  armazena os vértices onde  $d[v]$  já possui o custo do
   //menor caminho, enquanto o conjunto  $Q$  contem os vértices ainda em
   //análise
9    $Q \leftarrow \emptyset$ ;  $S \leftarrow \emptyset$ ;  $Q \leftarrow Q \cup s$ ;
10  enquanto ( $Q \neq \emptyset$ ) faça
11    |    $u \leftarrow \text{descobre\_mínimo}(Q)$ ;
12    |    $S \leftarrow S \cup u$ ;
13    |   para cada vértice  $v$  adjacente a  $u$  faça
14      |   // $c[u, v]$  é o custo da aresta  $u \rightarrow v$ 
15      |   se ( $v \notin S$ ) e ( $d[v] > d[u] + c[u, v]$ ) então
16        |   //relaxe ( $u, v$ )
17        |    $d[v] \leftarrow d[u] + c[u, v]$ ;
18        |    $\pi[v] \leftarrow u$ ;
19      |   fim
20    |   fim
21  fim
22 fim
```

---

**Algoritmo 2.3:** *BellmanFord*( $V, A, s$ )

**Entrada:** Lista *Vértices*  $V$ , lista *Arestas*  $A$ , *Vértice Inicial*  $s$ .

**Saída:** Lista de entrada  $V$ , modificada para que os atributos *distância* e *anterior* armazenem os caminhos mínimos e seus custos.

```

1  início
2  //Inicialização
3  para cada vértice  $v \in V$  faça
4      se  $v$  é origem então
5          |  $v.distância \leftarrow 0$ 
6      senão
7          |  $v.distância \leftarrow \infty$ 
8      fim
9       $v.anterior \leftarrow$  nulo
10 fim
11 //Relaxamento
12 para (i de 1 até NúmeroVértices) faça
13     para cada aresta  $a \in E$  faça
14          $u \leftarrow a.origem; v \leftarrow a.destino; //uv$  é a aresta de  $u$  para  $v$ 
15         se  $v.distância > u.distância + a.custo$  então
16             |  $v.distância \leftarrow u.distância + a.custo$ 
17             |  $v.anterior \leftarrow u$ 
18         fim
19     fim
20 fim
21 //Há ciclos negativos?
22 para cada aresta  $a \in E$  faça
23      $u \leftarrow a.origem; v \leftarrow a.destino; //uv$  é a aresta de  $u$  para  $v$ 
24     se  $v.distância > u.distância + a.custo$  então
25         | alerta: “O grafo possui ciclo com custo negativo”
26     fim
27 fim
28 fim

```

### Métodos para o Quarto Passo do Algoritmo de Sheffi

O quarto passo do algoritmo de Sheffi, conforme visto anteriormente, envolve computar um valor  $\alpha$  que minimiza uma função. Esse valor pode ser obtido através de diversos métodos, tais como o da *Razão Dourada*, o de *Fibonacci*, o da *Dicotomia*, entre outros [8].

A seguir, são descritos sucintamente três métodos de cálculo para o quarto passo do algoritmo de Sheffi, usando como exemplo de função a ser minimizada aquela que representa o PET-EU.

- **Razão Dourada** – o método da razão dourada tem por idéia básica determinar um intervalo  $[a,b]$  contendo o mínimo de uma função, de tal forma que o mesmo satisfaça a relação  $b - a < \epsilon$ , onde  $\epsilon > 0$  é suficientemente pequeno e  $\theta = \frac{\sqrt{5}-1}{2} \approx 0.618033988$ , como ilustra a Figura 2.2.

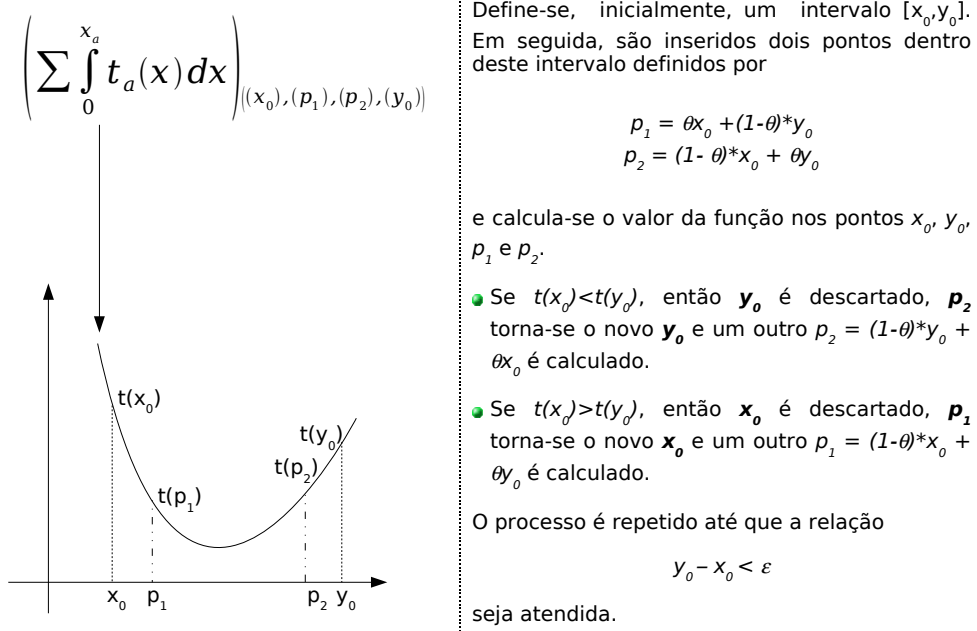
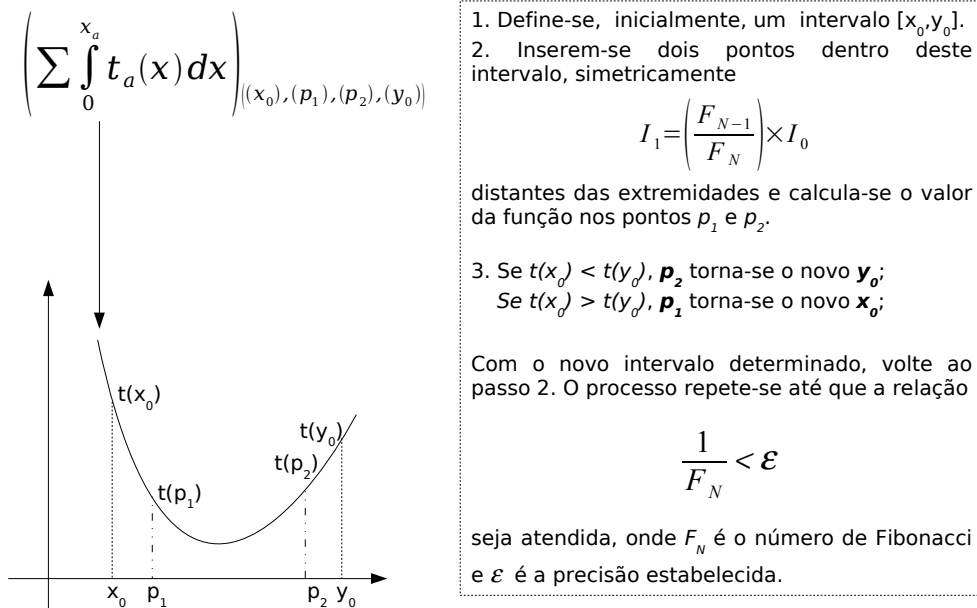


Figura 2.2: Método da razão dourada.

- **Fibonacci** – é um método de busca semelhante ao da razão dourada. Kiefer [38] usou a seqüência dos números de Fibonacci no desenvolvimento de um método de otimização de funções convexas, batizando-o de Busca de Fibonacci [45]. A seqüência dos números de Fibonacci é dada pela série  $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$ , onde  $F_0 = F_1 = 1$ . Tomando  $I_k$  como o intervalo de incerteza após  $k$  iterações e  $I_0$  o intervalo inicial, temos:  $I_k = \left(\frac{F_{N-k}}{F_N}\right) \cdot I_0$ , onde  $F_N$  é o número de Fibonacci ( $N$  é um número inteiro inicialmente escolhido), e  $k = 1, 2, \dots, N - 1$ . O processo de descoberta dos pontos que determinam o intervalo de incerteza é ilustrado na Figura 2.3.



**Figura 2.3:** Busca de Fibonacci.

- **Dicotomia** – caracteriza-se pela redução do intervalo de busca pela metade a cada iteração. Supondo que o ponto procurado pertença ao intervalo  $[a, b]$ , o método baseia-se na existência de uma tripla  $(x_1, x_3, x_5)$  tal que  $f(x_1) > f(x_3) < f(x_5)$  e que o ponto desejado encontra-se em  $[x_1, x_5] = [a, b]$ . Para se obter  $x_3$ , usa-se a expressão  $x_3 = \frac{x_1 + x_5}{2}$ , ponto este que divide o intervalo  $[x_1, x_5]$  em dois subintervalos de mesmo tamanho:  $[x_1, x_3]$  e  $[x_3, x_5]$ . Em seguida, geram-se os pontos  $x_2$  e  $x_4$ , com  $x_2 = \frac{x_1 + x_3}{2}$  e  $x_4 = \frac{x_3 + x_5}{2}$ . Compara-se então os valores gerados. Se  $f(x_1) > f(x_2) < f(x_3)$ , a nova tripla será  $(x_1, x_2, x_3)$ ; caso contrário, seu valor será  $(x_3, x_4, x_5)$ . O processo se repete até que o intervalo seja menor que um  $\epsilon$  pré-estabelecido.

Novaes [45] comparou esses métodos, considerando suas precisões em função do número de avaliações da função-objetivo, destacando a superioridade dos métodos de Fibonacci e da Razão Dourada em relação ao método da Dicotomia. Apontou como mais indicado o método da Razão Dourada devido à sua facilidade de implementação e aos valores muito próximos da precisão da busca de Fibonacci, razão pela qual este método foi adotado no presente trabalho.

## 2.2 Sistemas de Apoio à Decisão

Os Sistemas de Apoio à Decisão (em inglês DSS, ou *Decision Support Systems*) têm por objetivo analisar uma grande quantidade de informações, fornecendo meios para que decisões possam ser tomadas em relação a uma determinada questão. É função destas ferramentas levantar as informações necessárias de forma rápida e confiável e exibí-las de maneiras facilmente compreensíveis [9].

A simulação de tráfego urbano é uma das diversas atividades para as quais existem ferramentas DSS, principalmente dado o grande volume de informações habitualmente envolvidas em tais simulações, o qual exige apoio computacional para sua manipulação. Segue abaixo uma breve descrição das características de três sistemas DSS para esta área.

### 2.2.1 DRACULA e SATURN

Os simuladores DRACULA [34] e SATURN [35] são DSS desenvolvidos pela mesma empresa (O Instituto para Estudos do Transporte da Universidade de Leeds, Reino Unido) e podem ser usados em conjunto. O DRACULA incorpora uma estrutura microscópica de simulação enquanto o SATURN usa um modelo mesoscópico, sendo que ambos podem compartilhar uma base de dados, visando possibilitar a comparação desses dois modelos.

O SATURN (**S**imulation and **A**ssignment of **T**raffic to **U**rban **R**oad **N**etworks) teve seu desenvolvimento originado no final da década de 70, com o objetivo de avaliar esquemas de gerenciamento de tráfego em redes viárias urbanas [19].

Já o DRACULA (**D**ynamic **R**oute **A**ssignment **C**ombining **U**ser **L**earning and **M**icrosimul**A**tion) começou a ser desenvolvido pelo mesmo instituto em 1993. A meta do seu projeto era compor uma nova geração de modelos de transportes urbanos, quando comparado às abordagens tradicionais fundamentadas em equilíbrio (modelos macroscópicos) [19].

As tabelas 2.1 e 2.2 fornecem os preços em libras destes sistemas, da forma como eram praticados em 1º de abril de 2007, sendo que a empresa oferece descontos para versões educacionais [35].

Entre as características adicionais e recursos interativos oferecidos por esses sistemas, visando auxiliar o trabalho de análise do tráfego, podem ser citados [34, 35]:

- representar diretamente as escolhas dos motoristas, à medida que evoluem ao longo dos dias;
- definir regras para a mudança de faixas nas avenidas;
- estabelecer regulações para cruzamentos;

**Tabela 2.1:** Preços do SATURN

Versão	Reino Unido	Fora do Reino Unido
B	11.500	12.250
C	12.600	13.350
S	13.700	14.450
H	14.800	15.550
K	15.900	16.650
L	17.000	17.750
M1	18.100	18.850
M2	19.200	19.950
M3	20.300	21.050
N1	21.400	22.150
N2	22.500	23.250
N3	23.600	24.350

**Tabela 2.2:** Preços do DRACULA

Versão	Nº Máx. Nodes	Licença Simples	Site Licence
B	200	2.250	4.750
C	400	2.700	5.750
S	600	3.150	6.750
H	800	3.600	7.750
K	1.000	4.050	8.750
L	1.200	4.500	9.750

- determinar variações nas demandas da rede, como flutuações diárias e distribuição temporal; e
- simular a indisponibilidade de regiões da rede viária devido a fatores climáticos, acidentes ou bloqueios programados.

### 2.2.2 EMME2

O EMME/2 é um software de planejamento de redes de transporte *multimodais* desenvolvido pela empresa canadense *INRO Consultants Inc.* Em uma mesma simulação, através deste software, podem ser definidos quais os tipos de meios de locomoção (chamados de modos) serão usados em cada trecho do sistema de transporte. O software permite definir até 30 modos (automóveis, ônibus, caminhões, pedestres, etc.), sendo que um mesmo trecho pode comportar vários modos simultaneamente. Dessa forma, é possível, por exemplo, estimar o impacto do tráfego de automóveis no tempo de deslocamento dos ônibus, ou a influência dos ônibus em congestionamentos.

Mais recentemente foi lançado o sucessor deste software, o EMME/3. A empresa fabricante não disponibiliza em seu site da Internet os custos para aquisição do mesmo, sendo necessário o preenchimento de um cadastro para contato posterior.

Algumas propostas mais recentes, como o *Paramics Modeller* [22] e o VISSIM (Verkehr In Städten - SIMulation) [2], fazem uso de mapas e animações tridimensionais para exibir os fluxos de veículos em movimento em suas simulações microscópicas.

Um elemento importante de um sistema DSS é a forma como a modelagem e o resultado das simulações são apresentados ao usuário. Na próxima seção, será discutido como informações podem ser exibidas visualmente para os usuários, dentro de uma área chamada de Visualização de Informações.

## 2.3 Conceitos Básicos Sobre Visualização de Informações

A Visualização de Informações é uma área da ciência que investiga e propõe representações visuais para dados, em geral abstratos. O objetivo das técnicas de visualização é apresentar informações vinculadas aos dados ou permitir a descoberta de novas informações (tais como padrões de repetição, hierarquias, relações, dependências, evolução, etc) que, de outra forma, poderiam passar despercebidas. Tais técnicas são frequentemente interativas, possibilitando ao usuário manipular a representação gráfica da informação, desse modo aumentando a compreensão dos dados ali representados [12].

A área de Visualização de Informações explora o sentido humano da visão pois, dentre todos, este é o que possui maior capacidade de absorção de informações por unidade de tempo. A visão humana é rápida, paralela, tem a capacidade de distinguir cores e reconhece padrões muito facilmente. Além disso, ao organizar, agrupar e exibir visualmente dados sob aspectos específicos, as suas técnicas acabam por possibilitar a construção e a descoberta de novos conhecimentos [3].

O processo científico mais comum de construção de uma visualização [12] é ilustrado na Figura 2.4.

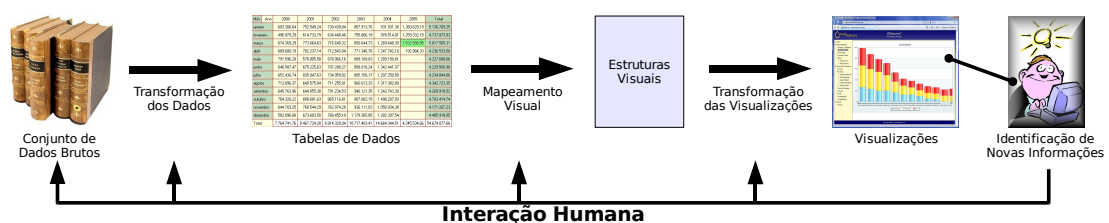


Figura 2.4: Processo de Construção de uma Visualização.

Esse processo consiste em (1) transformar dados brutos em dados filtrados e pré-processados para serem manipulados, (2) mapear os dados e seus atributos em objetos e atributos visuais de uma imagem, e (3) permitir a geração da imagem final e a interação com a mesma. Os dados normalmente são manipulados de acordo com a categoria à qual pertencem. As principais categorias são [12]:

- **Nominais:** conjunto de elementos distintos, sem qualquer ordem entre si. Por exemplo, tipos de objetos, tais como: computador, telefone, caneta, impressora, CD, papéis e etc.;
- **Ordinais:** conjunto de elementos distintos, mas que possuem uma ordem entre si. Por exemplo: dias da semana (segunda-feira, terça-feira, ...), meses do ano (janeiro, fevereiro, ...), ordem classificação em uma competição (campeão, vice, terceiro colocado, ..., “lanterna”);
- **Quantitativos:** valores numéricos. Esse tipo de dado também pode ser dividido em *Intervalos* (composto de valores discretos) e *Razão* (faixa contínua de valores).

### 2.3.1 Exemplos de Técnicas de Visualização

Algumas visualizações de informação fazem uso de idéias simples como variação de forma, de posição ou de cor para representar diferentes atributos de dados. A utilização de cor, por exemplo, representa um importante papel na visão humana. Evolutivamente, existem diversas teorias que procuram explicar porque os mamíferos (e, em particular, os primatas superiores) possuem essa capacidade. Algumas sugerem que animais altamente sociais como os primatas usam essa habilidade para reconhecer e discriminar outros membros de sua própria espécie, além de poder distinguir estados de humor através da modulação de cores da face (como corar e empalidecer) [14]. Já outras teorias propõem que a visão em cores formou-se devido à necessidade de encontrar frutas coloridas ocultas entre as folhagens, enquanto as próprias plantas precisavam dos primatas para a sua disseminação quando as frutas estavam prontas para germinar [51].

Independentemente das razões evolutivas, o uso adequado da cor e dos demais aspectos supracitados são importantes pois permitem enfatizar um objeto para o qual se deseja chamar a atenção.

Existem, contudo, técnicas de visualização gerais mais elaboradas que combinam variações de forma, cor e posição com outros elementos visuais, permitindo ampliar significativamente a cognição sobre os dados. Exemplos dessas técnicas são ilustrados na Figura 2.6 e descritos nas próximas seções.

#### Coordenadas Paralelas

A técnica de *coordenadas paralelas* foi proposta inicialmente por Inselberg [33] e permite relacionar informações entre si, mapeando um espaço  $n$ -dimensional em uma estrutura bi-dimensional que usa  $n$  eixos paralelos verticais equidistantes. Essa técnica enfatiza, principalmente, relações entre eixos adjacentes e conjuntos de dados que possuem padrões similares [43].



**Figura 2.5:** *Duas versões de uma mesma imagem, uma em cores (a) e outra em preto-e-branco (b). A visão em cores permite distinguir objetos mais facilmente baseando-se em suas composições cromáticas. Neste caso, a fruta que está madura e pode ser consumida.*

### Foco e Contexto

*Foco e Contexto* consiste em exibir um conjunto de informações ao usuário, destacando uma área de interesse (em foco), normalmente através de ampliação da mesma, ao mesmo tempo que mantém visível o restante da imagem (o contexto), em geral compactado-o [54].

Alguns exemplos específicos dessa técnica são o *browser hiperbólico* e *fish-eye*.

### Overview e Detail

A técnica de *Overview e Detail* é relativamente parecida com a de Foco e Contexto, contudo a visão geral dos dados é apresentada em uma pequena região da tela (o overview), enquanto o conjunto ampliado e detalhado dos dados de interesse é mostrado em outra área da visualização (o detail).

## 2.3.2 Importância da Efetividade e Expressividade

As técnicas de visualização de informações normalmente utilizam metáforas visuais para apresentar dados que habitualmente não possuem uma representação visual óbvia. Entretanto, deve-se ter em mente que, apesar de existirem diversas técnicas e modelos, cada aplicação requer um estudo cuidadoso a fim de se determinar se a imagem gerada é realmente útil e de fácil compreensão. Em geral, uma boa visualização atende a dois critérios que definem a sua utilidade e qualidade [43]:

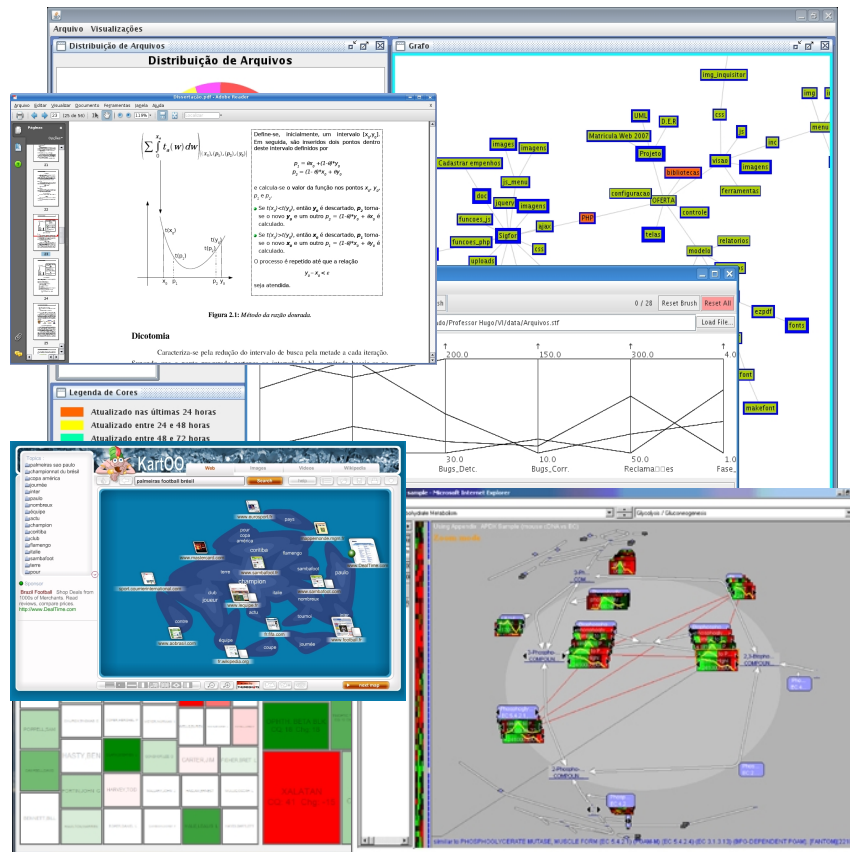


Figura 2.6: Alguns exemplos de visualizações.

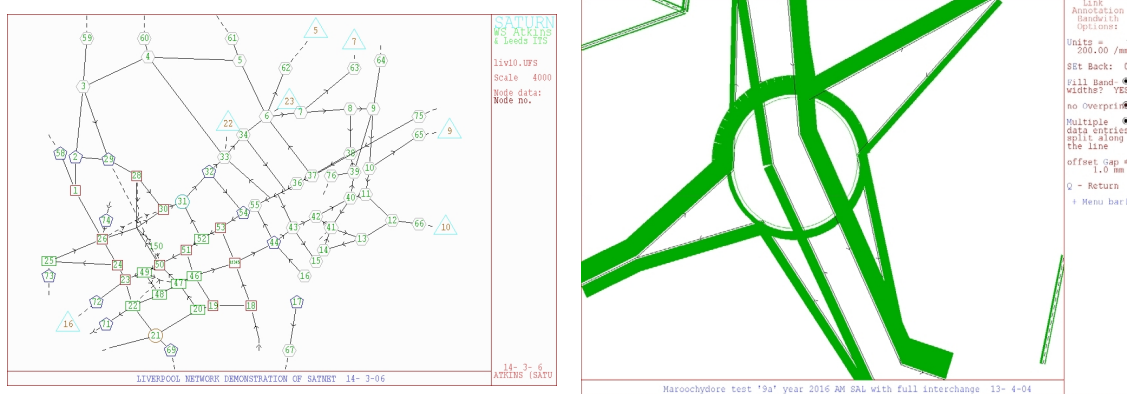
- **Expressividade:** uma visualização é considerada expressiva se é capaz de mostrar todos os dados de interesse do usuário;
- **Efetividade:** este critério visa medir a facilidade na compreensão da imagem apresentada. Uma visualização é efetiva se permite uma rápida percepção e não induz a erros de interpretação.

Estes dois critérios são importantes porque, sem os mesmos, uma visualização talvez não seja capaz de destacar padrões relevantes nos dados. Mais grave ainda, a visualização pode ser de difícil entendimento ou até mesmo sugerir padrões que na verdade não existem, levando o usuário a interpretações incorretas dos dados.

Abaixo estão os erros mais comuns que podem comprometer a expressividade e a efetividade de uma visualização [43]:

- não disponibilizar dados suficientes na visualização, de tal forma que as informações exibidas fiquem descontextualizadas;
- desconsiderar atributos importantes dos dados;
- usar escalas ou sistemas de coordenadas distintos em gráficos sobrepostos, o que inviabiliza uma comparação clara dos dados; e

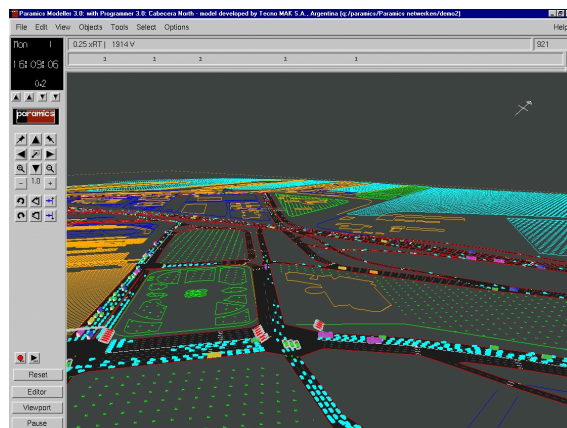




**Figura 2.8:** Algumas Visualizações do SATURN.



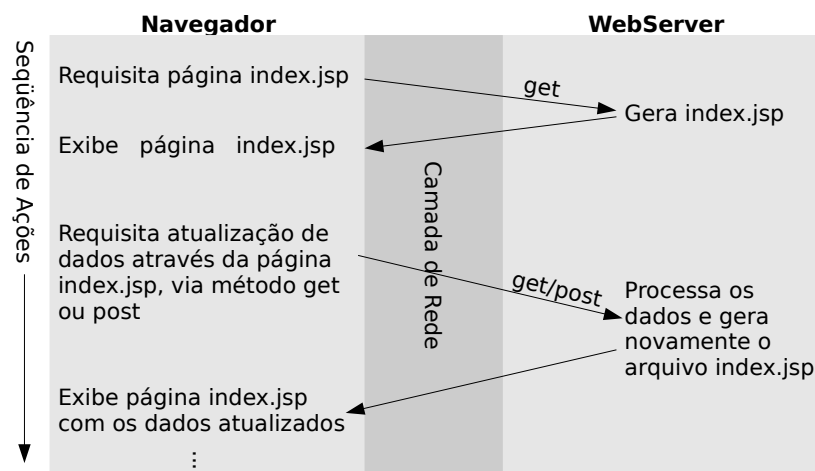
**Figura 2.9:** Simulação em Execução no VISSIM.



**Figura 2.10:** Simulação em Execução no Paramics Modeller V3.0.

## 2.4 Interfaces Ricas para a Web

Tradicionalmente, aplicativos Web centralizam a lógica da aplicação em uma arquitetura Cliente/Servidor. Todo o processamento é realizado remotamente (pelo servidor) e o cliente interage com uma tela estática (HTML ou JavaScript básico), convertendo-se quase que em um “terminal burro”. O grande problema desta abordagem é que cada interação com a aplicação deve ser feita pelo servidor, para onde os dados são enviados, processados e devolvidos ao cliente. Como resultado dessa filosofia, para toda interação, a página necessariamente deve ser recarregada no cliente como resposta, o que inviabiliza a distribuição de aplicações mais sofisticadas. A Figura 2.11 ilustra esse processo.



**Figura 2.11:** Sequência tradicional de requisições de uma aplicação Web.

Já o conceito *RIA* – *Rich Internet Application* contrapõe-se a essa abordagem, propondo a construção de aplicativos Web que são executadas no navegador e que possuem características de aplicações desktop. Esse conceito foi formalmente introduzido pela empresa MacroMedia em março de 2002, embora o mesmo já existisse sob outras denominações (como o X Internet da Forrester Research e o Microsoft Remote Scripting).

A idéia básica do RIA é transferir toda a lógica da aplicação para o browser cliente, enquanto o servidor permanece responsável pela persistência dos dados do usuário [23]. Note que também há uma relativa desvantagem nesse modelo, caracterizada pela necessidade de carregar parte ou todo o código da aplicação para o navegador. Porém, os tamanhos em geral pequenos dos aplicativos e as conexões de rede cada vez mais velozes estão tornando tal problema algo de menor importância.

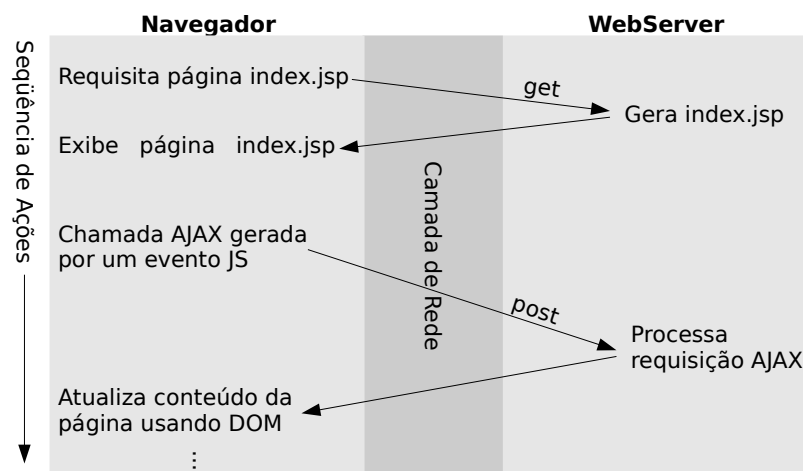
Entre as diversas tecnologias que implementam o conceito RIA, podem ser citadas:

- Adobe AIR, Adobe Flash e Adobe Flex,

- AJAX – Asynchronous JavaScript and XML,
- Applets Java,
- JavaFX,
- Microsoft ActiveX e Microsoft SilverLight.

A tecnologia AJAX pode ser considerada a mais importante, pois é disponibilizada diretamente pelo navegador, ao contrário das outras, as quais necessitam de instalação prévia [23].

Como exemplo, a Figura 2.12 ilustra o processo de funcionamento de uma aplicação AJAX.



**Figura 2.12:** Seqüência de requisições de uma aplicação AJAX.

Existem vários ambientes de desenvolvimento disponíveis para a construção de aplicativos usando essas tecnologias. Seguem abaixo algumas ferramentas livres e seus respectivos WebSites:

- Appcelerator - <http://www.appcelerator.com/index.html>
- Aptana Studio - <http://www.aptana.com>
- OpenLaszlo - <http://www.openlaszlo.org>

O conceito de RIA, bem como os demais conceitos introduzidos neste capítulo, são empregados na definição da arquitetura de análise e simulação do tráfego, descrita no próximo capítulo.

# A Arquitetura de Software para Análise e Simulação de Tráfego

---

Neste capítulo é apresentada uma nova arquitetura de software de apoio à decisão na análise e simulação de tráfego urbano. Essa arquitetura possui características inovadoras, tais como uma modelagem matemática adequada para a realidade do trânsito brasileiro, a execução direta em um navegador *Web* e um foco maior em interatividade e facilidade de uso.

## 3.1 Requisitos da Arquitetura

São apresentados a seguir os requisitos da arquitetura, especificados visando direcionar qualquer implementação da mesma:

1. **Utilizar Mapas Urbanos.** Devem ser utilizados mapas urbanos para representar e visualizar os diversos elementos constituintes da rede viária de uma cidade, tais como: ruas, avenidas, cruzamentos, praças, lotes, rotatórias, semáforos, entre outros.
2. **Implementar uma modelagem adequada à realidade brasileira.** A modelagem deve considerar aspectos específicos da rede viária brasileira, tais como rotatórias, conversões à esquerda e etc.
3. **Permitir Otimização Interativa.** A ferramenta de simulação de trânsito urbano deve permitir que o engenheiro de tráfego realize modificações na estrutura da rede viária, possibilitando o estudo e a avaliação do impacto de possíveis alterações antes que sejam efetivamente implantadas. Entre elas, podem ser citadas a construção de uma nova via, a duplicação de uma via existente, a construção de viadutos, a modificação do tempo de semáforo, a inversão da mão de uma rua, a simulação de acidente que bloqueie uma determinada via e a inserção e retirada de semáforos. Deve permitir também a comparação dessas alterações com a rede original ou redes diferentes entre si.

4. **Implementar Acesso Web Simplificado.** Todas as funcionalidades do sistema devem ser acessíveis através de uma interface Web, de forma a poderem ser utilizadas remotamente e independentemente de plataforma de hardware e software.
5. **Permitir Trabalho Colaborativo.** O sistema deve permitir que diversos usuários trabalhem de forma simultânea, modelando e analisando um ou mais projetos de tráfego.
6. **Possibilitar Preenchimento e Atualização Incremental da Base de Dados.** Deve ser possível inserir no sistema e atualizar de forma incremental os dados referentes às modelagens e às simulações. Com isso, uma base de modelagem de tráfego de uma cidade inteira pode ser construída a partir de acréscimos a uma pequena base inicial.
7. **Possuir Visualizações Interativas e Intuitivas.** O sistema deve possuir visualizações efetivas e expressivas que permitam inserir, apresentar e atualizar as informações relativas ao tráfego urbano. Recursos como planilhas, mapas da região em foco, visualizações de grafos, coloração, ícones e diagramas devem ser usados com o objetivo de facilitar a atividade do usuário.

## 3.2 Elementos e Funcionalidades da Arquitetura

A arquitetura está organizada em quatro módulos, conforme ilustra a Figura 3.1.

O *Módulo de Armazenamento e Recuperação de Dados* é responsável pelo fornecimento dos mapas e das informações sobre a rede viária urbana em si, das políticas de tráfego e das demandas de veículos. Ele armazena também os resultados de simulações anteriores, de modo que seja possível mensurar diferenças entre propostas distintas para o tráfego.

O *Módulo de Simulação* possibilita a modelagem e simulação de uma rede viária. Os diversos componentes que descrevem a estrutura da rede viária são chamados *Projetos*, conforme descrito na próxima seção.

O *Módulo de Visualização* é responsável pela exibição dos fluxos computados de veículos. Ele disponibiliza também formas de interação com as informações exibidas.

O *Módulo de Apresentação e Interação* disponibiliza a interface com o usuário, a apresentação dos mapas e a exibição dos resultados do cálculo do tráfego. Ele é executado dentro do navegador *Web* do usuário, enquanto os três módulos anteriores normalmente estão localizados em servidores remotos.

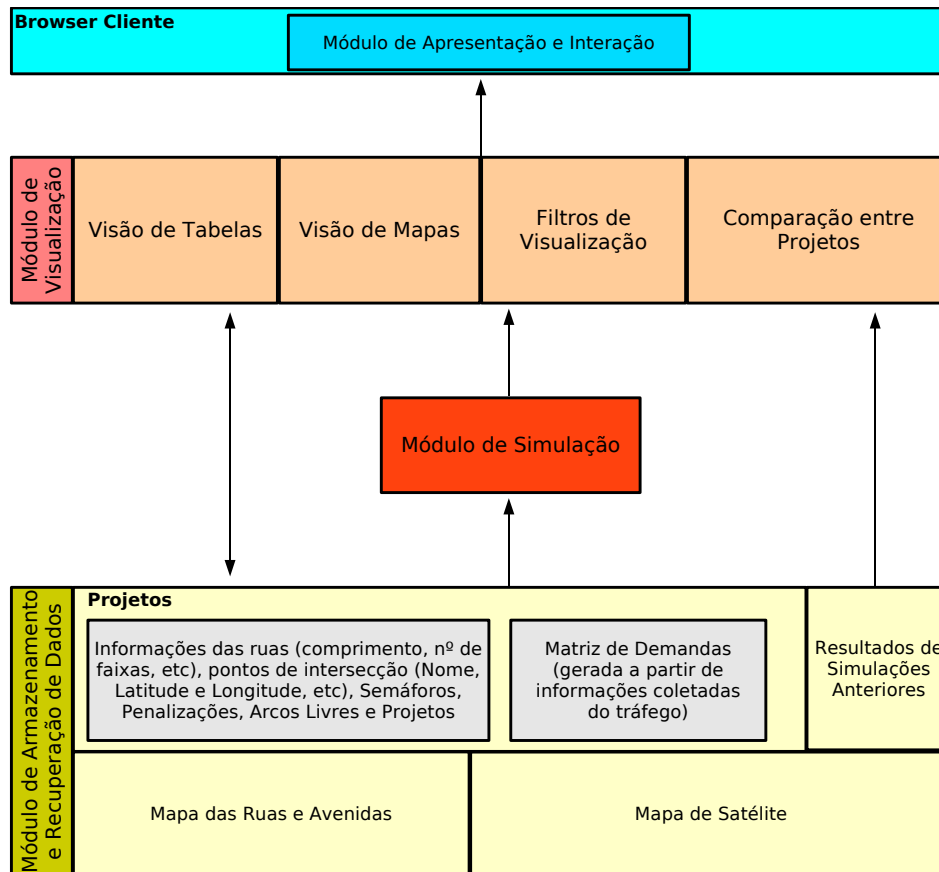


Figura 3.1: Módulos da Arquitetura.

### 3.2.1 Projetos

A simulação do tráfego necessita de um conjunto de informações sobre a estrutura da rede viária e das demandas de veículos que por ela pretendem deslocar-se. Esse conjunto de informações é organizado em *Projetos* e é composto de sete elementos, descritos a seguir:

1. **Nós** – armazenam as coordenadas geográficas das intersecções (cruzamentos) entre ruas/avenidas;
2. **Arcos** – mantêm informações sobre o tipo da avenida, comprimento, velocidade livre, número de faixas e seu nome;
3. **Demandas** – número de veículos que devem deslocar-se do nó  $i$  ao nó  $j$  no período de tempo em estudo;
4. **Semáforos** – localizados no final de um arco, interferem no tempo de deslocamento dos automóveis;

5. **Arcos Livres** – conjunto de dois arcos consecutivos (conectados por um nó) que indicam as conversões permitidas entre as ruas/avenidas, conforme definidas pelas regras de trânsito do local;
6. **Penalizações** – A conversão entre ruas/avenidas é permitida, porém o tempo de deslocamento dos veículos no arco é penalizado devido ao fato de tratar-se de uma rua não-preferencial;
7. **Nós Falsos** – Informações de coordenadas geográficas usadas durante o desenho dos arcos, pois há uma grande quantidade de avenidas que são curvas ou não são perfeitamente retas. Com isso, seu desenho coincide mais fielmente com o mapa.

As ações que disponíveis em relação aos projetos podem ser assim resumidas:

- **Criação** – cria um projeto com as 7 tabelas que compõem o sistema.
- **Cópia** – essa ação duplica os dados do projeto, bem como todos os dados de nós, arcos, demandas, semáforos, arcos livres, penalizações e nós falsos;
- **Alteração** – permite alterar todos os dados do projeto. As alterações podem ser realizadas tanto visualmente sobre o mapa, quanto no modo tradicional, usando-se tabelas.
- **Exclusão** – elimina o projeto do banco de dados, bem como apaga todos os registros que dele são dependentes. Essa ação não pode ser desfeita.

As ações sobre projetos devem ser imediatamente persistidas no bando de dados. Deve ser possível também definir as coordenadas iniciais do mapa, bem como seu nível de zoom para visualização e guardá-los no banco juntamente com o projeto ao qual estão vinculados.

Nas próximas seções são descritas com mais detalhes as características dos módulos que compõem a arquitetura.

### 3.3 Módulo de Simulação

O Módulo de Simulação é o responsável pela modelagem do tráfego e cálculo dos fluxos de veículos na rede viária. Ele faz uso dos modelos matemáticos para a determinação do ponto de equilíbrio da rede viária, tanto para os modelos **EU** e **OS**, conforme descritos nas seções [2.1.2](#) e [2.1.3](#).

### 3.3.1 Modelagem Matemática

São apresentadas a seguir as definições básicas formais da modelagem macroscópica proposta para a arquitetura e como o processo de alocação do tráfego pode ser computado.

#### Definições Básicas

Seja a *rede viária*  $G = (V, E)$ , onde  $V$  é um conjunto de nós (interseções) e  $E$  um conjunto de arcos direcionados (ruas ou avenidas). Cada arco  $a \in E$  possui um comprimento (em metros)  $c_a$ , uma quantidade de faixas  $f_a$ <sup>1</sup> e uma velocidade livre  $v_a$ <sup>2</sup>.

O *custo de um arco*  $a$ , representado por  $t_a$ , é o tempo médio necessário que os veículos levam para percorrer esse arco. Esse custo é dado por funções de latência que modelam como os veículos fluem por uma rua/avenida. Há treze tipos de funções  $t_a$ , cada uma representando um tipo de arco. Tais funções são descritas mais adiante.

Uma *demanda*  $d_{i,j}$  corresponde a uma quantidade inteira positiva de veículos que deseja deslocar-se de  $i$  para  $j$ , respectivamente nós origem e destino, da rede viária  $G$ . Quando os pontos de origem e destino estiverem subentendidos, representaremos a demanda apenas por  $d$ .

Um vetor  $D$  de demandas de veículos de origens a destinos (O-D) no dígrafo é considerado conhecido. Esse vetor geralmente contém demandas para um determinado período do dia.

Um fluxo  $x_a$  no arco  $a$  é a quantidade de veículos que trafega por este arco. O fluxo total  $X$  na rede é composto pelos fluxos os  $x_a$ , para todo arco  $a \in E$ . O fluxo  $X$ , a ser computado, é considerado viável se atende à demanda total  $D$ . O *fluxo da rede*,  $X_G$ , é dado por  $X_G = \bigcup_{a \in E} x_a$

Representamos por  $X_d$  o *fluxo de uma demanda*  $d \in D$ , com  $X_d \in \mathbb{R}^{|E|}$ . Ou seja,  $X_d$  consiste dos fluxos em todos os arcos da rede necessários para atender à demanda  $d$  específica (o deslocamento de veículos entre dois nós), inclusive dos fluxos nulos.

O tempo  $T_G$  de tráfego na rede é o vetor de tempos  $t_a$  necessário para percorrer todos os arcos  $a \in E$ , com  $T_G \in \mathbb{R}^{|E|}$  e  $|T_G| = \sum_{a \in E} t_a$ .

O *estado da rede viária* é dado por  $S_G = \langle X_G, T_G \rangle$ . O *custo total* de tráfego consiste de  $C_G = \sum_{a \in E} t_a * x_a$

Quando o grafo estiver subentendido, representaremos  $X_G, T_G, S_G$  e  $C_G$  apenas por  $X, T, S$  e  $C$ , respectivamente.

<sup>1</sup>Mede-se a largura da faixa da rua/avenida sem veículos estacionados no horário em estudo. Cada 3,5 metros de largura correspondem a uma faixa.

<sup>2</sup>Velocidade média mantida pelos motoristas em situação de pista livre ou com pouco fluxo – em km/h.

O PET consiste em, dado  $G, t_a$  e  $D$ , encontrar um fluxo viável  $X^*$  tal que qualquer outro fluxo viável  $X$  seja pior que  $X^*$  em relação às formulações dos modelos EU e OS descritos na Seção 2.1.2.

### Os Tipos de Arco e suas Funções $t_a$

O ponto central no modelo de Beckmann (Seção 2.1.2) é a construção de uma ou mais funções capazes de descrever o tempo médio que os veículos levam para percorrer um determinado trecho da rede viária (funções  $t_a$ ). Entretanto, como descrito na subseção “Otimização do Usuário e Otimização do Sistema” da Seção 2.1.2, o modelo original de Beckmann pressupõe que as funções devem considerar apenas as características físicas e de fluxo no próprio arco, desprezando efeitos exercidos por fluxos de veículos em outras avenidas. Embora esta abordagem seja apropriada para arcos que não tenham contato com outros fluxos, como por exemplo auto-vias, acaba não sendo adequada para aquelas ruas/avenidas que são efetivamente influenciadas pelo movimento de outros veículos. Entre estas, podem ser citadas as avenidas não-preferenciais, onde os motoristas devem esperar a vez antes de continuar a viagem, ou aquelas que incidem em uma rotatória.

Portanto, para uma melhor aproximação à realidade, as funções  $t_a$  devem considerar tais influências durante o cálculo de tempo de viagem. Abaixo segue a descrição dos tipos de arco e das funções  $t_a$  associadas aos mesmos.

- Tipo 1: mão única e com semáforo

$$t^{(1)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{2500 * f_a} + \left( \frac{x_a}{500 * f_a} \right)^3 \right] + s * \left( 3 + \frac{3.6 * c_a}{v_a} \right)$$

- Tipo 2: mão dupla separada com semáforo

$$t^{(2)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{2500 * f_a} + \left( \frac{x_a}{500 * f_a} \right)^3 \right] + s * \left( 3 + \frac{3.6 * c_a}{v_a} \right)$$

- Tipo 3: mão dupla com semáforo

$$t^{(3)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{3x_a + z}{8000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{z}{1500 * f_a} \right)^3 \right] + s * \left( 3 + \frac{3.6 * c_a}{v_a} \right)$$

- Tipo 4: mão única e preferencial

$$t^{(4)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{4000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 \right]$$

- Tipo 5: dividida e preferencial

$$t^{(5)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{4000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 \right]$$

- Tipo 6: mão dupla com interação com mão contrária

$$t^{(6)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{3x_a + z}{14000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{z}{1600 * f_a} \right)^3 \right]$$

- Tipo 7: mão única, não-preferencial.  $y_1$  e  $y_2$  são fluxos preferenciais.

$$t^{(7)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{2500 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 \right] + \left( \frac{y_1}{300} \right)^2 + \left( \frac{y_2}{300} \right)^2$$

- Tipo 8: dividida, não preferencial.  $y_1$  e  $y_2$  são fluxos preferenciais.

$$t^{(8)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{2500 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 \right] + \left( \frac{y_1}{300} \right)^2 + \left( \frac{y_2}{300} \right)^2$$

- Tipo 9: mão dupla com interação com mão contrária, não-preferencial.  $y_1$  e  $y_2$  são fluxos preferenciais.

$$t^{(9)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{3x_a + z}{10000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{900 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{z}{1600 * f_a} \right)^3 \right] + \left( \frac{y_1}{300} \right)^2 + \left( \frac{y_2}{300} \right)^2$$

- Tipo 10: Mão única em rotatória.

$$t^{(10)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{3000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{1200 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{w_1}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_2}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_3}{1800} \right)^3 \right]$$

- Tipo 11: Duas pistas separadas em rotatória.

$$t^{(11)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{3000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{1200 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{w_1}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_2}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_3}{1800} \right)^3 \right]$$

- Tipo 12: Mão dupla em rotatória.

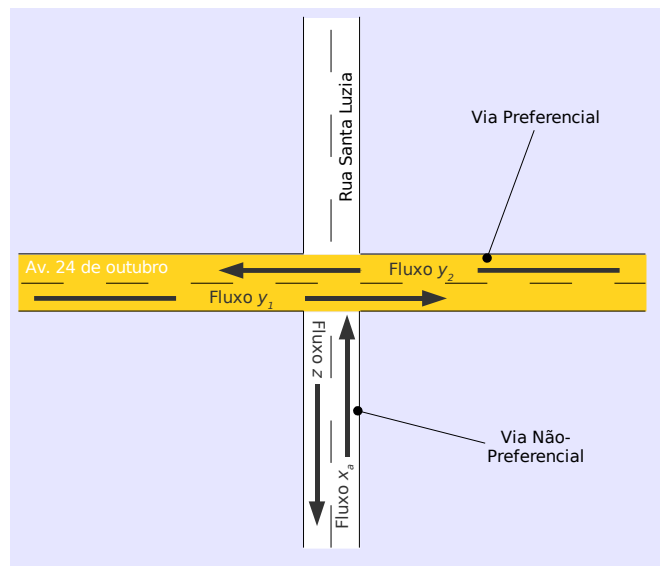
$$t^{(12)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{3x_a + z}{12000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{1200 * f_a} \right)^3 + \left( \frac{w_1}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_2}{1800} \right)^3 + \left( \frac{w_3}{1800} \right)^3 + \left( \frac{z}{2000 * f_a} \right)^3 \right]$$

- Tipo 13: Mão dupla múltipla, de várias vias distintas, podendo existir ou não vias preferenciais incidindo no nó de destino.

$$t^{(13)} = \frac{3.6 * c_a}{v_a} \left[ 1 + \frac{x_a}{2000 * f_a} + \left( \frac{x_a}{1000 * f_a} \right)^3 \right] + \left( \frac{y_1}{300} \right)^2 + \left( \frac{y_2}{300} \right)^2$$

Nestas funções, as variáveis adicionais têm os seguintes significados:

- $x_a$ : fluxo (quantidade) de veículos percorrendo o arco  $a$ , durante uma hora;
- $z$ : fluxo na contramão de  $a$ , em vias sem divisão entre as pistas (durante uma hora);
- $y_1$  e  $y_2$ : fluxos em vias preferenciais em interseção com a via  $a$ , considerada no ponto terminal (destino), durante uma hora. Vide Figura 3.2;



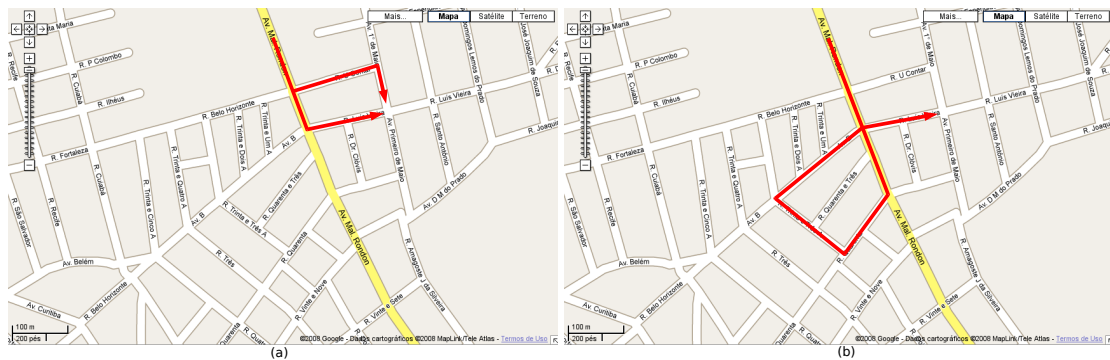
**Figura 3.2:** Exemplo de fluxos em vias preferenciais.

- $w_1$ ,  $w_2$  e  $w_3$ : outros fluxos incidentes no nó destino do arco  $a$ , tipo rotatória, em sentido horário em relação ao mesmo (durante uma hora)
- $s$ : Fator de semáforo. Este é um valor real que representa o atraso provocado por um semáforo no tempo de percurso dos veículos em um arco. Esse fator deve ser estimado de tal forma que  $s * \left(3 + \frac{3.6 * c_a}{v_a}\right)$  represente o tempo médio de atraso gerado pelo semáforo no fluxo de veículos, com base em medições de campo.

Os parâmetros das funções  $t_a$  foram obtidos através de observação e medição de fluxo real de tráfego, durante um determinado período do dia (mais especificamente, entre 07h00 e 08h00 da manhã). No entanto, elas não pretendem expressar de modo definitivo a relação entre o tempo de viagem e os parâmetros em uso podendo, portanto, ser adaptadas a qualquer momento para uma melhor aproximação em relação a novas medições.

### Arcos Livres

O presente trabalho necessitou realizar uma adaptação no grafo representante da rede viária urbana antes de utilizar os algoritmos de cálculo de caminhos mínimos (Seção 2.1.3). Como o grafo original  $G$  representa interseções (nós) e ruas/avenidas (arcos), nem todos os caminhos mínimos são válidos, pois há conversões que não podem ser realizadas, conforme ilustrado na Figura 3.3.



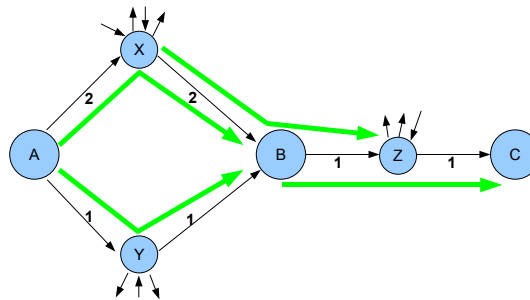
**Figura 3.3:** O caminho visivelmente mais curto entre a Av. Marechal Rondon e a Avenida 1º de Maio é através da U. Contar ou da R. Luís Vieira, conforme demonstrado em (a). No entanto, essas conversões não são permitidas, sendo necessário fazer um loop, muito mais longo, como mostrado em (b).

Desta forma, as conversões ou continuações permitidas foram representadas através de *Arcos Livres*. Um arco livre  $l$  consiste em um par de arcos  $(a_r, a_p)$  de  $G$ , tal que  $a_r = (i, j)$  e  $a_p = (j, k)$ , com  $i, j$  e  $k$  nós de  $G$ . Somente os pares de arcos de uma rede viária que são especificados como arcos livres permitem uma conversão livre.

Consequentemente, o algoritmo de caminhos mínimos deve ser executado não sobre o grafo original  $G$  da rede viária, mas sobre um grafo  $G'$  derivado de  $G$ , considerando um conjunto  $L$  de arcos livres.

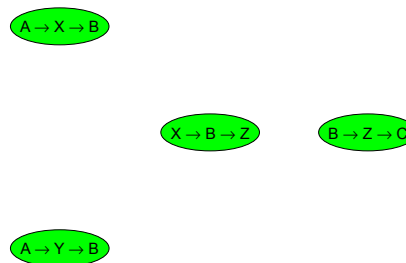
A seguir, é apresentado um exemplo da construção de  $G'$  a partir de  $G$  e  $L$ .

1. Seja o grafo  $G = (V, E)$ , com  $A$  seu vértice inicial, uma função de custo  $c$  para cada aresta de  $E$  e uma lista  $L$  arcos livres, conforme a Figura 3.4:



**Figura 3.4:** Grafo original representando ruas, cruzamentos e arcos livres.

2. Cada arco livre  $(u, v, w)$  de  $G$  torna-se um vértice  $\langle u, v, w \rangle$  em  $G'$ . Vide Figura 3.5.

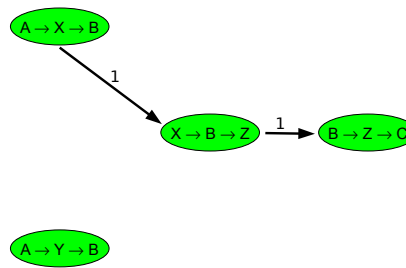


**Figura 3.5:** Nós criados a partir dos arcos livres.

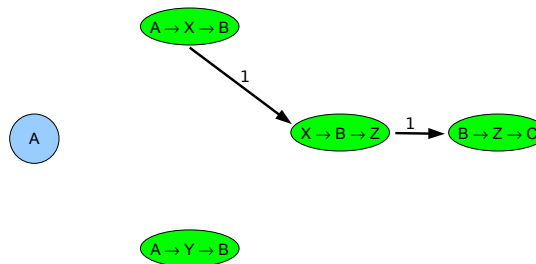
3. Cada par de arcos livres  $(u, v, w)$  e  $(v, w, z)$  gera uma aresta  $(\langle u, v, w \rangle, \langle v, w, z \rangle)$  em  $G'$ , cujo custo  $c'$  é dado por:  $c'(\langle u, v, w \rangle, \langle v, w, z \rangle) = (c(w, z))$ , conforme a Figura 3.6.
4. O vértice  $A$  de  $G$  também torna-se um vértice de  $G'$ . Vide Figura 3.7.
5. Cada arco livre  $(A, v, w)$  gera uma aresta  $(A, \langle A, v, w \rangle)$  em  $G'$ , com custo  $c'$  é dado por  $c'((A, \langle A, v, w \rangle)) = c(A, v) + c(v, w)$ , conforme a Figura 3.8.

O grafo resultante  $G' = (V', E')$  tem as seguintes dimensões:

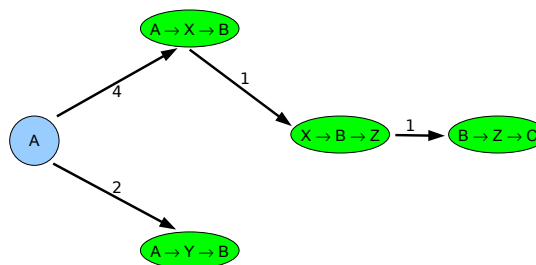
- $|V'| = 1 + |L|$ ;



**Figura 3.6:** Arestas do novo grafo.



**Figura 3.7:** Vértice inicial "A".



**Figura 3.8:** Custo das arestas partindo de "A".

- $|E'| = \text{Quantidade} - \text{ArcosLivres} - \text{Iniciando} - \text{Em}(A) + \text{Quantidade} - \text{Pares} - \text{ArcosLivres} - \text{Formato} - (\langle \underline{uvw} \rangle), (\langle \underline{vwz} \rangle).$

Dado um caminho em  $G'$  partindo de  $A$  e terminando em um vértice  $v$  em  $G'$ , é possível construir o caminho correspondente em  $G$ . Porém, esse processo exige escolher o menor caminho de  $A$  até os vértices de  $G'$  cujos índices possuam como sufixo  $v$  (os índices de dois ou mais vértices de  $G'$  podem terminar com o mesmo sufixo). Além disso, é preciso considerar o custo das arestas diretas  $(A, v)$ , caso elas existam em  $G$ .

### O Algoritmo de Otimização

A implementação da solução computacional para o PET é construída por algoritmos que, no caso do presente trabalho, baseiam-se nas soluções propostas por Sheffi

e Frank-Wolfe. Uma descrição mais detalhada desse algoritmo é apresentada a seguir e também pode ser encontrada na literatura [53, 6, 17].

- **Passo 1:**  $i := 0$ . Encontre um fluxo  $x^0$  inicial viável.

Em um primeiro momento, não há qualquer fluxo de veículos deslocando-se pela rede viária, apenas uma certa quantidade de automóveis que pretende sair de um nó **A** para um nó **B**, ou seja, uma *Demanda de Veículos*.

Como todos os fluxos iniciais são nulos, todas as funções  $t_a$  ficam reduzidas ao primeiro termo de suas equações

$$\frac{3.6 * c_a}{v_a}$$

que é o tempo necessário (em segundos) para se percorrer o arco em uma situação de pista completamente livre. Esses tempos nos arcos são seus custos (ou pesos) e serão os valores usados pelos algoritmos de cálculo de caminhos mínimos (Seção 2.1.3), mas usando a transformação descrita na Seção 3.3.1.

Computados os caminhos mínimos, é feita uma atribuição *tudo-ou-nada* das demandas. Em outras palavras, todos os veículos que pretendem deslocar-se de um ponto a outro seguirão pelo caminho mínimo entre esses dois pontos. A Figura 3.9 ilustra o processo para um grafo simples com apenas 3 demandas. Esse é o fluxo inicial viável  $X^0$ .

- **Passo 2:** Calcule  $t_a^i(x_a^i)$ ,  $\forall a \in E$ .

Com o fluxo viável  $X^i$  em mãos, calcula-se novamente os tempos de percurso. Como agora os fluxos de veículos não são nulos, seus tempos de deslocamento serão diversos do primeiro cálculo, e outros caminhos mínimos serão computados para as demandas.

- **Passo 3:** Com os tempos  $t_a^i$  obtidos, calcule e encontre caminhos de tempo mínimo (ver algoritmos na Seção 2.1.3) para cada demanda O-D. A partir dos caminhos mínimos, computa-se o fluxo  $y_a^i$  para cada arco  $a$ , conforme descrito na Seção 3.3.1 e na Figura 3.9.

- **Passo 4:** Encontre  $\alpha^i \in \mathbb{R}$  no intervalo [0,1] (ver algoritmos na Seção 2.1.3) que minimize a função:

Agora que são conhecidos  $x^i$  e  $y^i$ , os dois são usados como os pontos extremos de uma função que será minimizada em busca de uma solução ótima. Esta função é

$$\sum_{a=1}^{|E|} \int_0^{x_a^i + \alpha(y_a^i - x_a^i)} t_a^i(x_1^i, x_2^i, \dots, \omega, \dots, x_m^i) dx \quad \text{para o PET-EU ou}$$

$$\sum_{a=1}^{|E|} x_a^i * t_a^i(x_1^i, x_2^i, \dots, \omega, \dots, x_m^i) \quad \text{para o PET-OS}$$

Neste exemplo simples, existem 3 demandas de veículos. Seus valores e caminhos mínimos são:

$A \rightarrow E$  ( $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$ ) : 100 veículos

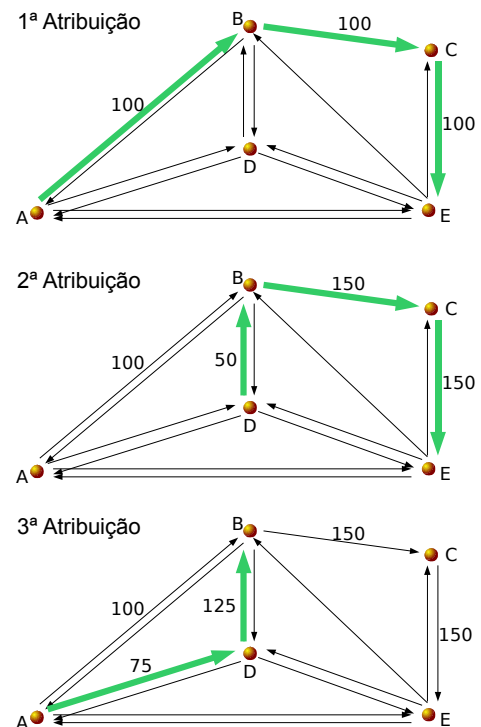
$D \rightarrow E$  ( $D \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$ ) : 50 veículos

$A \rightarrow B$  ( $A \rightarrow D \rightarrow B$ ) : 75 veículos

● Na 1ª atribuição de fluxos, a demanda  $A \rightarrow E$  de 100 veículos percorre o caminho mínimo em direção ao seu vértice de destino;

● Na 2ª atribuição, a demanda  $D \rightarrow E$  de 50 veículos é distribuída ao longo de seu caminho mais curto. Como os arcos  $B \rightarrow C$  e  $C \rightarrow E$  já possuem carros trafegando por eles, seus fluxos passam a valer 150;

● Por fim, na 3ª atribuição a demanda  $A \rightarrow B$  é distribuída. O arco  $D \rightarrow B$  já tem 50 carros, e seu fluxo passa a ser 125.



**Figura 3.9:** Exemplo de atribuição de fluxos pelos caminhos mínimos.

e é minimizada usando-se o método da Razão Dourada, conforme descrito na Seção 2.1.3.

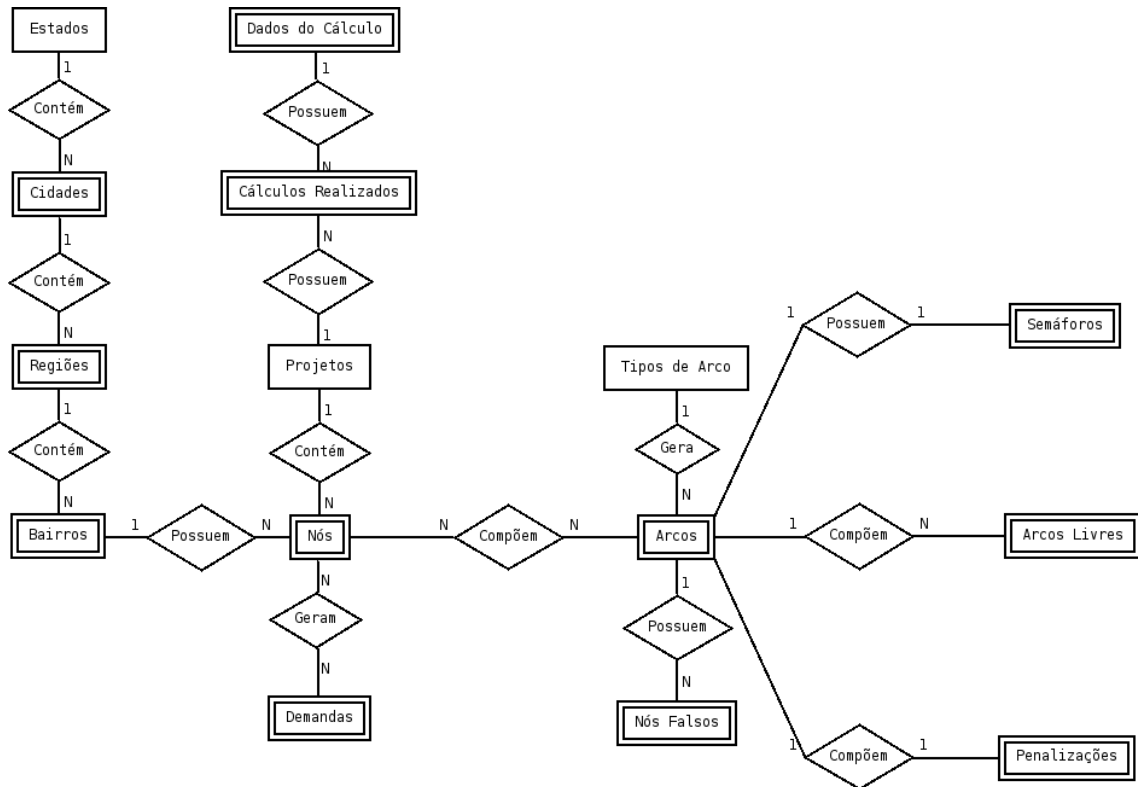
- **Passo 5:** Faça  $x^{i+1} = x^i + \alpha^i(y^i - x^i)$
- **Passo 6:** Teste a convergência  $\epsilon$ . Se  $|x^{i+1} - x^i| < \epsilon$ , o algoritmo termina. Se não,  $i := i + 1$  e volta ao passo 2.

## 3.4 Módulo de Armazenamento e Recuperação de Dados

As entidades que representam a estrutura da rede viária podem ser observadas no MER da Figura 3.10. Tais entidades envolvem dados da estrutura física da rede viária, bem como dados das modelagens e simulações realizadas.

### 3.4.1 Possíveis SGBD para Utilizar

Existe disponível atualmente uma quantidade considerável de SGBDs - Sistemas Gerenciadores de Banco de Dados - no mercado, cada um com características próprias, tanto pagos quanto de uso livre. Não é objetivo deste trabalho discutir qualidades e deméritos entre essas duas filosofias. Porém, como uma das diretivas básicas adotadas



**Figura 3.10:** Modelo Entidade-Relacionameto das Entidades Componentes da Rede Viária.

pele autor deste trabalho para a implementação da ferramenta descrita no Capítulo 4 foi o uso exclusivo de tecnologias livres, a escolha do SGBD para uso também obedeceu esta diretriz, o que ajudou a diminuir a quantidade de opções a serem analisadas.

Embora também haja um bom número de SGBDs livres à disposição, três deles são os mais usados atualmente, e foram os analisados durante a fase de levantamento de requisitos da arquitetura: MySQL, FireBird e PostGreSQL. A seguir, uma descrição sucinta e uma breve história dos mesmos.

- MySQL.** É o único SGBD, entre os três em análise, que possui uma licença dupla, sendo uma livre e outra paga. Foi concebido a partir da necessidade de seus criadores - David Axmark, Allan Larsson e Michael Widenius, na década de 90 - de usarem uma interface SQL compatível com as rotinas ISAM que utilizavam em suas aplicações e tabelas. Num primeiro momento, tentaram usar a API do mSQL, contudo esta não era tão rápida quanto eles necessitavam. Então, a partir dela, escreveram sua própria em C e C++, dando origem ao MySQL. Graças à sua velocidade e facilidade de uso, acabou tornando-se um dos mais populares SGBDs em todo o mundo. As principais críticas eram sobre o excessivo foco no desempenho em detrimento da implementação de recursos mais sofisticados, como

Stored Procedures, Triggers, Views, Integridade Referencial, entre outros. Esses e vários outros recursos agora estão presentes desde a versão 5;

- **FireBird.** SGBD que surgiu a partir da liberação, em julho de 2000, do código-fonte do Interbase 6.0 pela sua proprietária, a Borland Inc. A história do Interbase remonta a 1984, quando o seu desenvolvimento teve início. Portanto, pode-se dizer que o FireBird “herdou” 16 anos de código testado e de comprovada eficiência. Seu desenvolvimento agora está sob responsabilidade da FireBird Foundation, uma organização sem fins lucrativos e que continuamente implementa novos recursos ao mesmo. Entre estes recursos, podem ser destacados: total suporte a Stored Procedures, Triggers de Conexão e Transação, Views, Integridade Referencial em Cascata, Funções Externas (UDFs), Backups Incrementais e On-Line, Cursores em PSQL, Tabelas de Monitoramento e Tabelas Temporárias. O limite teórico atual de um arquivo de banco de dados que ele pode gerenciar é de 64Tb, então o limite prático acaba sendo o espaço em disco e o gerenciamento de arquivos do SO. Caso seja necessário mais espaço, pode-se usar múltiplos arquivos;
- **PostgreSQL.** É um projeto de SGBD de código-fonte aberto coordenado pelo PostgreSQL Global Development Group. Suas origens remontam ao projeto Ingres, desenvolvido na Universidade de Berkeley, Califórnia. Em 1985 o líder do projeto, Michael Stonebraker, começou o desenvolvimento de um novo sistema, baseado no Ingres, e que por fim acabou sendo batizado de Postgres. O projeto foi abandonado oficialmente pela Universidade de Berkeley em 1994. Entretanto, como o código fonte estava sob uma licença BSD, o seu desenvolvimento não foi interrompido e continua até os dias atuais, sempre agregando mais recursos e melhorando cada vez mais a estabilidade. Ele atualmente conta com características sofisticadas, tais como Controle de Concorrência Multiversões, Write-Ahead Log, Outer Joins, TableSpaces, SavePoints, Two-Phase Commit, Tipos de Dados Geométricos, entre diversas outras. Em fevereiro de 2008 foi lançada a versão mais recente: a 8.3.

Conforme pode ser observado nas descrições anteriores, estes três SGBDs já estão suficientemente maduros e podem ser considerados em aplicações sérias, de pequeno, médio e até de grande porte [29, 56]. Seu continuado desenvolvimento torna-os candidatos adequados a qualquer projeto cujas necessidades eles possam atender.

### 3.4.2 Base de Dados de Mapas

Existem diversas bases de dados, tanto proprietárias (por exemplo, o MUBDG da COMDATA-GO e outras bases governamentais) quanto de livre acesso, que disponibilizam mapas urbanos. Além disso, algumas delas são globais, públicas e de livre acesso, tais como o GoogleMaps ou o Microsoft LiveMaps. Tais bases são facilmente acessíveis,

cobrem praticamente todo o globo e estão em constante atualização, permitindo a construção de simulações de tráfego de diversas regiões com um pequeno esforço de adaptação dos sistemas. Além disso, boa parte das bases globais de mapas oferecem APIs de programação que permitem o desenvolvimento de aplicações personalizadas.

## 3.5 Módulo de Visualização

Aplicações na área de simulação de tráfego urbano tradicionalmente apresentam os resultados das simulações e os dados de entrada de duas formas: usando tabelas para mostrar os resultados dos cálculos ou exibindo estes resultados graficamente sobre mapas da região de interesse. Conforme mencionado na Seção 2.3.3, algumas propostas mais recentes, como o *Traffic Modeller 3.0* [22] e o VISSIM (Verkehr In Städten - SIMulation) [2] fazem uso inclusive de mapas tridimensionais para exibir os fluxos de veículos em movimento em suas simulações microscópicas.

A arquitetura proposta deve, portanto, implementar pelo menos duas formas de visualizações: uma *Visão de Tabela* e uma *Visão de Mapa*, possibilitando ao usuário alternar entre as mesmas a qualquer momento. Deve disponibilizar também gráficos comparativos entre projetos, permitindo a comparação visual entre propostas distintas para uma mesma rede viária.

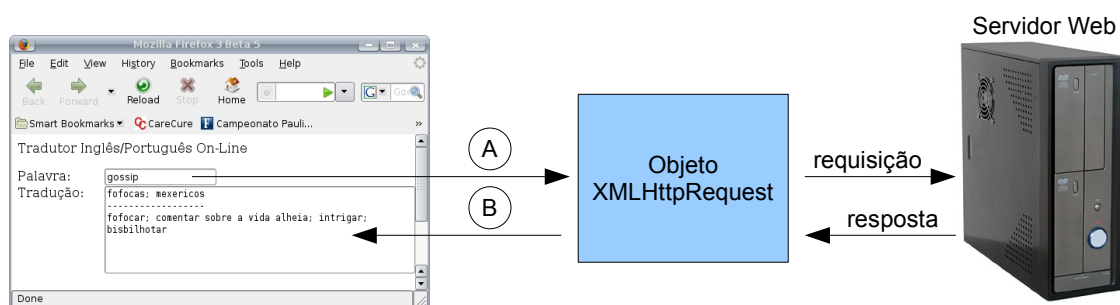
Tais visualizações devem possuir formas de interação, de modo a possibilitar filtragem dos dados – minimizando assim a sobrecarga de informações visuais em uma região com grande densidade; destacar informações de interesse, como, por exemplo, ruas problemáticas; ampliar e reduzir áreas do mapa; e indicar conversões permitidas nas ruas, bem como semáforos, pontos de origem ou destino de demandas e etc.

### 3.5.1 Protocolos de Comunicação

O termo AJAX - Asynchronous JavaScript and XML - designa um conjunto de tecnologias que, ao serem usadas conjuntamente, permite tornar a interação dos usuários com uma aplicação Web mais rica e produtiva. O seu principal objetivo é agilizar a troca de informações entre o servidor e a aplicação que está sendo executada no navegador. Isto é conseguido através de requisições e respostas assíncronas entre as duas partes envolvidas na comunicação. Dentre as tecnologias que em conjunto formam o AJAX, podem ser destacadas:

- **HTML (HyperText Markup Language)/XHTML (Extensible HyperText Markup Language):** Linguagens de marcação usadas na criação de documentos Web, sendo o XHTML uma reformulação da HTML baseada em XML com o objetivo de combinar as tags de marcação de HTML com regras de XML;

- **CSS (Cascade Style Sheets):** Mecanismo usado para implementar estilos aos documentos Web. Seu principal benefício é promover a distinção entre o conteúdo de um documento e a sua formatação;
- **XML (Extensible Markup Language):** Linguagem de marcação para a criação de documentos estruturados de forma hierárquica. É largamente utilizada para a troca de dados pela Web e tornou-se tão popular que até aplicações não-Web fazem uso. Um exemplo é o formato ODF.
- **DOM (Document Object Model):** Tecnologia que permite manipular a estrutura do documento que está carregado no navegador de forma dinâmica;
- **Objeto XMLHttpRequest:** Ponto central da tecnologia AJAX. É através dele que requisições assíncronas, usando o protocolo HTTP, são realizadas pela aplicação que está sendo executada no navegador. À medida em que o usuário interage com a página, requisições são enviadas ao servidor Web, que devolve os resultados - geralmente em formato XML. De posse destes resultados, o navegador atualiza seu conteúdo usando DOM.



- (A) A palavra a ser traduzida é enviada ao servidor pelo objeto XMLHttpRequest quando o usuário pressiona a tecla Enter.
- (B) A área destinada à exibição da resposta é atualizada com a resposta fornecida pelo servidor ao objeto XMLHttpRequest.

**Figura 3.11:** Exemplo de uso do objeto XMLHttpRequest.

A figura 3.11 ilustra o processo. Uma página cujo conteúdo pode ser acessado e atualizado via JavaScript (usando DOM) pede ao objeto XMLHttpRequest que entre em contato com o servidor e realize a tradução de uma palavra. Este, ao receber a solicitação, consulta uma base de dados e monta uma resposta XML através de ASP, JSP, PHP ou uma outra linguagem dinâmica qualquer. A resposta, por sua vez, é devolvida ao objeto XMLHttpRequest que, de posse da mesma, chama uma rotina que atualiza o conteúdo da página usando DOM.

A arquitetura aqui proposta utiliza as tecnologias AJAX de modo a atualizar dinamicamente seu conteúdo. O único ponto da mesma que não foi usado refere-se às

respostas fornecidas pelo servidor Web, que não são enviadas em formato XML. Isto deve-se ao volume relativamente grande de dados que o servidor deve mandar ao cliente quando determinadas ações são executadas (por exemplo, ao abrir um projeto) e que geram um elevado tráfego de dados, comprometendo a performance da aplicação. Em seu lugar, as respostas são montadas em formato CSV - Comma-Separated Values.

## O Sistema PET-Gyn

---

Este capítulo apresenta o sistema PET-Gyn, implementado segundo os requisitos discutidos no Capítulo 3.

As funcionalidades oferecidas pelo sistema são as seguintes:

- executar diretamente no navegador, sem a instalação de qualquer software adicional. Assim, além de facilitar a sua adoção, a aplicação permite o seu uso em qualquer sistema operacional e/ou dispositivos móveis que acessem páginas Web;
- criação de novas ruas e cruzamentos, bem como, alteração de atributos das ruas já existentes, de forma a mensurar eventuais efeitos no tráfego;
- exibição, com o uso de cores, das velocidades médias dos veículos em cada trecho do percurso, no período do dia em análise;
- destaque visual de avenidas com problemas de velocidade.
- simulação das conseqüências em médio e longo prazos de um eventual fechamento de uma ou mais avenidas;
- comparação entre projetos, permitindo estimar os impactos de reestruturações na malha viária, de forma que o usuário possa avaliar se tais modificações, ao serem implementadas, atingem um determinado objetivo almejado.

O sistema pode ser acessado em <http://www.inf.ufg.br/~funcomp/>.

### 4.1 Linguagens e Tecnologias Utilizadas para Implementação

Uma das premissas básicas para a implementação da arquitetura proposta na Seção 3.2 foi o uso exclusivo de tecnologias gratuitas, de código-fonte livre ou não. Ao eliminar custos com aquisições de licenças de software, espera-se facilitar a adoção da ferramenta pelos órgãos da administração pública responsáveis pelo gerenciamento do

trânsito urbano. Portanto, as soluções tecnológicas utilizadas para implementar cada componente da arquitetura do sistema, de acordo com a descrição apresentada na Seção 3.2, foram as seguintes:

1. **Servidor Web.** Baseou-se nas seguintes ferramentas:

- **Apache HTTP Server** – é o servidor HTTP mais utilizado no mundo. Totalmente gratuito e de código-fonte aberto, ele é mantido pela *Apache Software Foundation* e, em abril de 2008, representava 49,41% de todos os servidores Web em atividade, de acordo com o site Netcraft [44]. O Apache possui versões para uma grande variedade de plataformas e sistemas operacionais, entre eles o Windows, Novell Netware, MacOS, OS/2 e vários que seguem o padrão POSIX (Unix, Linux, FreeBSD, entre outros). Graças à sua comprovada robustez, confiabilidade e ampla documentação, este foi o servidor HTTP adotado pelo presente trabalho.
- **Java Server Pages** – tecnologia usada para o desenvolvimento de páginas e aplicações para a Web. Segue a mesma filosofia das tecnologias PHP e Active Server Pages da Microsoft, mas usando Java como linguagem de programação. JSP produz dinamicamente documentos HTML, XML ou outro formato desejado em resposta a requisições dos clientes e é executado dentro de um *servidor de aplicação* compatível com a tecnologia Java EE. Entre os servidores de aplicação existentes, podem ser citados o Tomcat e o Glassfish.
- **Tomcat** – um dos mais de 60 projetos mantidos pela *Apache Software Foundation*. Trata-se do servidor de aplicações Java para a Web oficialmente endossado pela Sun como a Implementação de Referência (RI) para as tecnologias Java Servlet e Java Server Pages.

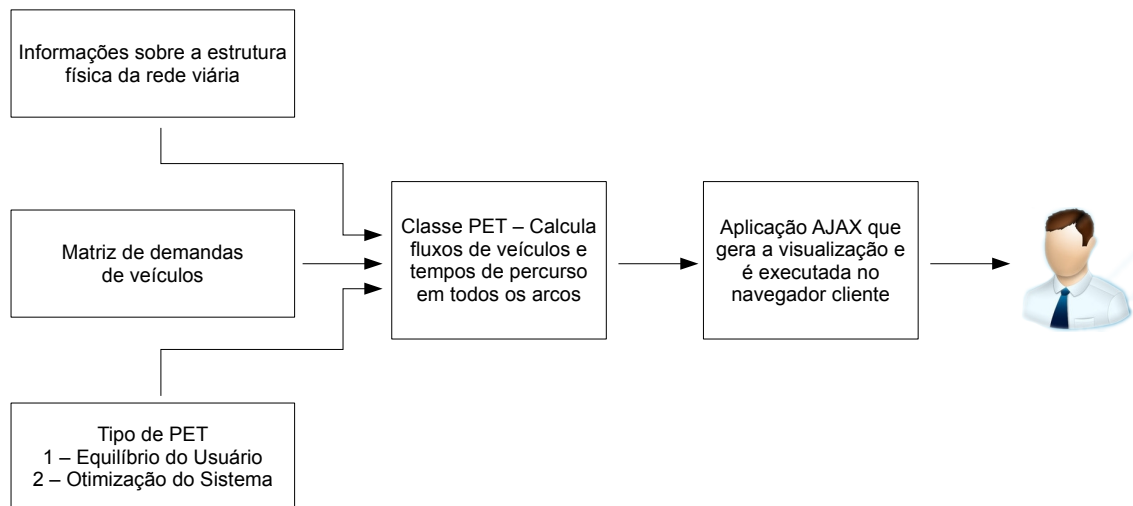
2. **Classe PET.** A classe que resolve o Problema de Equilíbrio de Tráfego foi construída em Java, linguagem de programação lançada e mantida pela Sun Microsystems. Java é fortemente orientada a objetos e possui uma sintaxe que, em vários aspectos, é similar ao C. Ao contrário de outras linguagens, os programas desenvolvidos em Java não são compilados para código nativo, e sim para um formato intermediário chamado “bytecode”. Este, por sua vez, é executado em uma “Máquina Virtual Java” ou JVM, que nada mais é do que um programa que cuida de carregar e executar o bytecode. Graças a esta característica, programas escritos em linguagem Java podem ser executados em qualquer plataforma de software e hardware, desde que haja uma versão da JVM disponível para a mesma. Java é hoje uma linguagem bastante popular, sendo utilizada para desenvolver desde aplicações Desktop convencionais até software para rodar em navegadores Web e dispositivos

móveis, como telefones celulares. Java foi, portanto, a tecnologia adotada na parte de modelagem e simulação do tráfego.

3. **Visualização PET.** Foi utilizada a tecnologia AJAX para apresentar visualmente no navegador Web do usuário os resultados dos cálculos dos fluxos de veículos e para permitir interação com esses dados. O acrônimo **Asynchronous Javascript And XML** – AJAX – refere-se ao uso de um conjunto de tecnologias fornecido pelos navegadores Web (Seção 3.5.1) com o objetivo de construir páginas que mimetizam aplicações Desktop.
4. **Base de Dados PET.** Conforme mencionado na Seção 3.4.1, existem diversos SGBDs livres disponíveis hoje em dia. O presente trabalho optou pelo uso do FireBird devido à maior experiência do autor em seu uso e também pela sua ampla adoção em diversas empresas e órgãos governamentais, tais como a Embrapa, DataPrev, NossaCaixa e DataSus, entre outros [25], o que atesta sua confiabilidade. Além disso, sua grande disponibilidade para diversos sistemas operacionais (Windows, Linux, Solaris - Sparc e X86 -, Mac OS X, FreeBSD, NetBSD, AIX, HP-UX e SCO) torna-o facilmente transportável caso uma mudança de plataforma de hardware ou de software seja necessária. Esse é, portanto, o SGBD responsável pelo armazenamento dos dados da malha viária e das simulações realizadas.
5. **Servidor de Mapas.** Conforme discutido na Seção Capítulo 3.4.2, o servidor de mapas é responsável pelo fornecimento dos mapas que serão exibidos ao cliente, da API para a manipulação e personalização dos mesmos, bem como a criação de aplicações. Existem dois serviços deste tipo disponíveis no mercado: o *GoogleMaps*, da empresa Google Inc, e o *LiveMaps*, da Microsoft. No final, o presente trabalho optou pelo uso do GoogleMaps, pois os mapas por ele disponibilizados são mais completos – pelo menos da área em análise, que é a região metropolitana de Goiânia – embora algumas avenidas mais recentes não sejam exibidas.

## 4.2 Fluxo Principal de Dados

O conjunto de dados principal (fluxo de veículos em cada arco e tempo de percurso dos mesmos) é gerado a partir de 3 fontes. A classe PET, responsável pelo cálculo, coleta as informações sobre a estrutura da malha viária e as demandas, gerando então os fluxos que atendam aos critérios exigidos pelo tipo de PET (Seção 2.1.2). De posse destes dados, a classe PET entrega-os à classe AJAX, responsável pela visualização dos dados e interação com o usuário. Por fim, o servidor Web envia um pacote contendo todos estes dados (fluxos, tempos e aplicação AJAX) ao navegador cliente. A figura 4.1 exibe esse processo.



**Figura 4.1:** Fluxo principal de dados da simulação.

## 4.3 Detalhes de implementação dos algoritmos de modelagem e simulação

Esta seção apresenta alguns detalhes de implementação dos algoritmos especificados no Capítulo 3.

### 4.3.1 Sobre Arcos Incidentes em Rotatória

Conforme a Seção 3.3.1, avenidas que desembocam em rotatória – os tipos 10, 11 e 12 – têm seu tempo de percurso influenciado de forma distinta pelos diversos arcos incidentes no ponto de convergência. Quanto mais próximos “à esquerda” os arcos estiverem da avenida em análise, maior será a influência de seus fluxos sobre essa avenida. Para exemplificar a forma como tais influências se dão, tomemos como exemplo uma situação real ilustrada na Figura 4.2.

Neste caso, o arco para o qual se deseja calcular o tempo de percurso (Rua Des. José Neto Carneiro) está destacado em verde (na função  $t_a$ , este é o fluxo  $x$ ). Sua contra-mão é o fluxo  $z$ . Os carros que estão deslocando-se pela Av. Contorno (fluxo  $w_1$ ) possuem apenas duas alternativas: entrar à direita ou contornarem a rotatória. No primeiro caso, essa decisão afeta muito pouco o tempo de percurso dos carros na R. Des. José Neto Carneiro. No segundo caso, entretanto, estes carros possuem a preferência de deslocamento em relação ao fluxo  $x$ , o qual deve esperar a liberação da rotatória para que possa continuar a viagem.

De forma análoga, o fluxo de veículos deslocando-se pela Rua Duzentos e Trinta (fluxo  $w_2$ ) também influencia os tempos de viagem do fluxo  $x$ . Porém, como  $w_2$  possui



**Figura 4.2:** Rotatória da Rua 230 com a Avenida Contorno, a Rua Desembargador José Neto Carneiro e a Av. Henrique Silva.

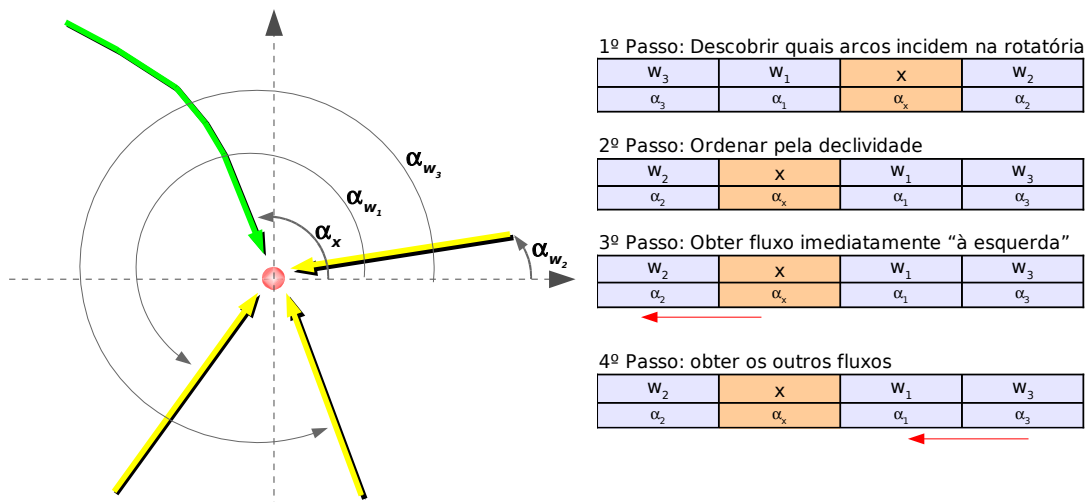
três alternativas – entrar à direita na Av. Contorno, seguir pela R. Des. José Neto Carneiro ou entrar à esquerda na Av. Henrique Silva (fluxo  $w_3$ ) – apenas estes últimos interferem no tempo de viagem do fluxo  $x$ . Sua influência é, portanto, menor do que a exercida por  $w_1$ .

O mesmo vale para o fluxo  $w_3$ . Sua influência em  $x$ , contudo, é ainda menor que a de  $w_2$ , pois este possui 4 alternativas de deslocamento, e poucos veículos decidirão voltar pela rotatória.

Uma vez que a disposição destas avenidas afeta de forma distinta o tempo de viagem do fluxo  $x$ , é necessário identificá-las e classificá-las em relação à avenida em interesse.

Para tanto, uma análise geométrica do cruzamento em questão é realizada, na qual o centro de um sistema de coordenadas é fixado no ponto de convergência dos arcos e as declividades de cada rua (arco) são calculadas, conforme pode observado na Figura 4.3.

O processo consiste de manter um vetor com esses arcos, organizados em ordem crescente de suas declividades (ângulos  $\alpha$ ). Em seguida, cria-se uma lista com os arcos



**Figura 4.3:** Descobrendo fluxos em rotatória.

do vetor selecionados, percorrendo-se do arco em análise (neste exemplo, o arco  $x$ ) em direção ao elemento inicial e depois, de forma circular, partindo do final do vetor para o arco de interesse.

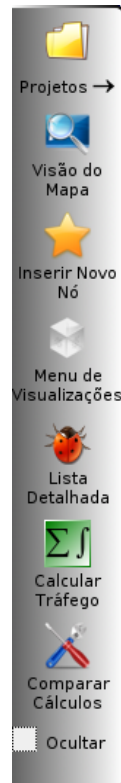
A lista resultante, excluindo-se o arco em análise, contém, em ordem decrescente de influência, os arcos que afetam o fluxo  $x$ . De posse dessas informações, os tempos de percurso nos arcos de tipo 10, 11 e 12 podem ser computados.

## 4.4 Interface com o Usuário

A ferramenta PET-Gyn possui duas visões Web distintas para a interação. Na primeira, o usuário acessa e manipula as informações do banco de dados na forma de tabelas, onde pode inserir, atualizar e excluir os registros. Na segunda, essas ações são realizadas sobre um mapa da região, sendo que a ferramenta cuida de construir uma ligação entre o mapa e a base de dados. A alternância entre as duas visões, bem como algumas operações administrativas, são realizadas por uma barra de ferramentas localizada na margem esquerda da tela. A seguir, são apresentados os detalhes da barra de ferramentas e das visões.

### 4.4.1 Barra de Ferramentas

Essa barra dá acesso às principais funcionalidades do sistema e está disponível tanto na *Visão de Tabelas* (Seção 4.4.2) quanto no modo *Visão do Mapa* (Seção 4.4.2). As ferramentas incluídas na mesma são:



**Figura 4.4:** Barra de Ferramentas do PET-Gyn.

- **Projetos** – lista todos os projetos armazenados no banco de dados, de forma que o usuário possa escolher em qual projeto trabalhar. Permite também criar um projeto vazio, duplicar um projeto existente e optar entre calcular os modelos EU ou OS (Seção 2.1.2);
- **Visão do Mapa/Visão de Tabelas** – alterna entre os dois modos possíveis de se visualizar as informações da rede viária;
- **Inserir Novo Registro** – esta opção permite inserir um novo registro em uma tabela do projeto. Ela é sensível ao contexto, inserindo o novo registro na tabela atualmente ativa;
- **Menu de Visualizações** – esta ferramenta permite visualizar as velocidades máximas permitidas em cada trecho e, após o cálculo dos fluxos de veículos, as velocidades computadas e as vias com problemas de velocidade;
- **Lista Detalhada** – janela que exibe uma listagem com informações sobre os fluxos de veículos, os tempos de percurso e as velocidades médias em cada arco da malha viária, conforme pode ser observado na Figura 4.5;
- **Calcular Tráfego** – executa o cálculo dos fluxos de veículos. Os resultados dos fluxos e tempos de percurso são armazenados para consulta posterior;
- **Comparar Cálculos** – realiza a comparação entre dois projetos.

Origem → Destino	Comp.	Vel. Livre	Faixas	Tempo	Fluxo	Veloc. Média	Nome
83 -> 290	600	60	2.5	36.0	306.0	59.9	PPS norte
170 -> 172	650	60	2.5	66.2	1331.0	35.3	Goiás Norte sul
170 -> 176	660	40	1.5	68.6	366.0	34.6	oeste da Goiás Norte para Urias Magalhães
170 -> 2092	590	40	1.5	53.1	21.0	40.0	leste de Goiás Norte para Urias Magalhães
172 -> 170	650	60	2.5	49.5	646.0	47.3	Goiás Norte norte
172 -> 174	170	45	2	15.2	6.0	40.2	Av. Central
172 -> 180	250	60	2.5	44.1	1355.0	20.4	Av. Goiás Norte sul
174 -> 176	375	40	1.5	34.6	0.0	39.0	Av. Francisco Magalhães noroeste
174 -> 177	190	45	2	15.3	389.0	44.8	Av. Central
175 -> 177	150	40	1.5	15.2	0.0	35.6	Rua Curitiba leste
175 -> 186	600	40	1.5	54.0	0.0	40.0	Rua Vitória Regia sul
176 -> 170	660	40	1.5	72.8	55.0	32.7	leste de Urias Magalhães para Goiás Norte
176 -> 174	375	40	1.5	34.3	383.0	39.3	Av. Francisco Magalhães sudeste
176 -> 182	320	50	1.75	24.4	356.0	47.2	Av. Mantiqueira sul
177 -> 175	150	40	1.5	13.5	0.0	40.0	Rua Curitiba oeste
177 -> 178	140	45	2	11.2	389.0	44.8	Av. Central
178 -> 180	250	45	2	66.7	401.0	13.5	Av. Central
178 -> 286	800	55	1.75	163.1	0.0	17.7	Av. Rio Branco sul
178 -> 2087	600	35	1.25	61.7	21.0	35.0	Acesso a sudeste U. Magalhaes

**Figura 4.5:** Lista Detalhada dos Fluxos e Tempos.

#### 4.4.2 Visão de Tabelas

A Visão de Tabelas, ilustrada na Figura 4.6, possui três componentes principais, conforme descritos abaixo:

1. **Barra de tabelas** – permite alternar entre o conjunto de dados que forma um projeto: nós, arcos, demandas, penalizações, arcos livres, semáforos e nós falsos.
2. **Dados de tabela** – região que exibe os dados da tabela atualmente ativa.
3. **Ações no registro** – consiste de um conjunto de botões que permite editar, remover e localizar no mapa (opção disponível para os nós) o registro da tabela selecionada.


#### 4.4.3 Visão de Mapa

Nesta visão é exibido um mapa sobre o qual é desenhada a malha viária, composta por avenidas e intersecções. A Figura 4.7 ilustra seus componentes, os quais são:

1. **Botões de Navegação** – permitem deslocar o mapa para visualizar outras regiões do mesmo. Esta ação também pode ser realizada através do método arrastar e soltar, usando o mouse, bem como com as setas do teclado;

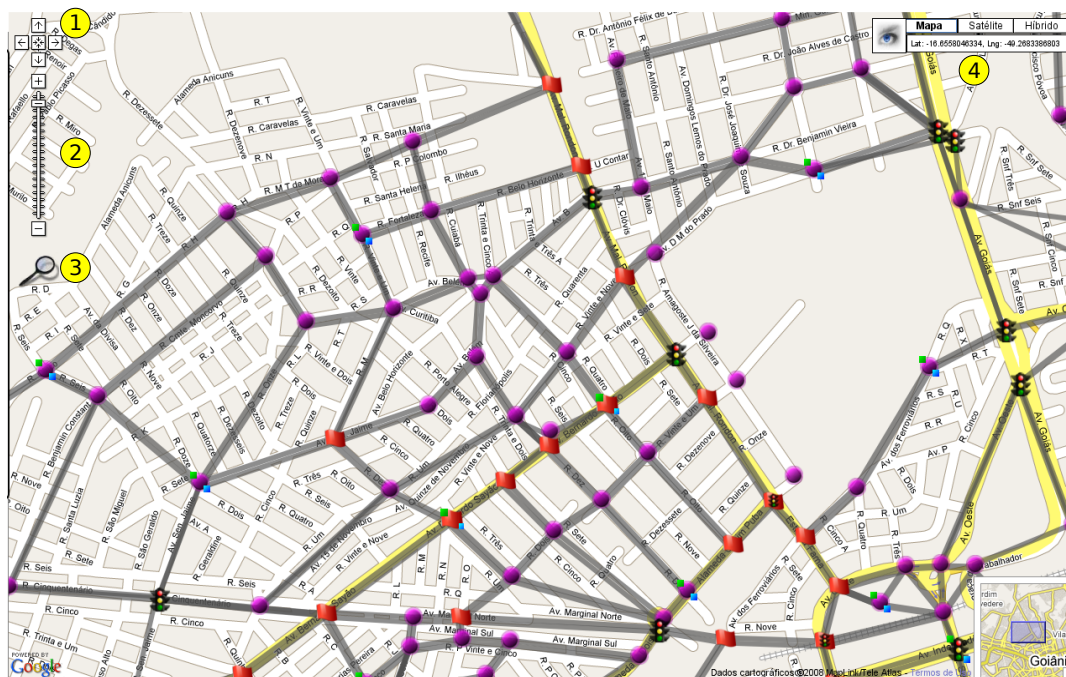
idNo	idBairro	NumeroNo	CoordenadaX	CoordenadaY	Local	Nô
83		-49.2545394897	-16.6380424500		PPS com nova saída ao leste	
170		-49.2735977173	-16.6334781647		Goiás Norte com Francisco Araújo	
172		-49.2729949951	-16.6380825043		Av. Goiás Norte com Central (norte)	
174		-49.2742385864	-16.6387825012		Av. Central com Francisco Magalhães	
175		-49.2756996155	-16.6406536102		Rua Curitiba com Vitória Régia	
176		-49.2794761658	-16.6370964050		Av. Francisco Magalhães e Mantiqueira	
177		-49.2743453979	-16.6401596069		Av. Central com Rua Curitiba	
178		-49.2735977173	-16.6409206390		Av. Rio Branco com Central	
180		-49.2715377808	-16.6401195526		Av. Goiás Norte com Central (sul)	
181		-49.2714271545	-16.6391105652		Av. Central com Francisco Bibiano	
182		-49.2802467346	-16.6418666840		Av. Brig. Faria Lima e Mantiqueira	
184		-49.2796897888	-16.6428947449		Brig. Faria Lima com São Domingos	
186		-49.2779312134	-16.6455249786		Mal. Rondon com Vitória Régia	
286		-49.2764282227	-16.6476840973		Mal. Rondon com Rio Branco	
288		-49.2678031921	-16.6439628601		Av. Goiás Norte com Pampulha	
289		-49.2656364441	-16.6470890045		Av. Goiás Norte entrada norte de C.O.	
290		-49.2586593628	-16.6433258057		PPS com José Carneiro	
292		-49.2601432800	-16.6437778473		PPS com Fuad Rassi	
302		-49.2390060425	-16.6488151550		Venerando com Alam, Pampulha	
7013	354	304	-49.2423973083	-16.6459369659	Início da Av. João Leite	
7008	354	306	-49.2422676086	-16.6470470428	São Francisco na entrada para Jaó	
5533	9	309	-49.2561950684	-16.6533164978	Couto Magalhaes com Rua 17	
5532	9	310	-49.2569236755	-16.6499042511	Cel. Francisco Frôes com Eng. Fuad	
5531	9	311	-49.2580833435	-16.6519813538	Praça Eng. Correia Lima	
5500	15	312	-49.2449722290	-16.6518573761	Av. Ver. José Monteiro com Rua Dona Stella	
181	9	313	-49.2612991333	-16.6488151550	Min. Guimaraes Neto com Emilio Povoa	

Figura 4.6: Visão de Tabelas do Projeto.

- Zoom Slider** – aumenta ou diminui o nível de zoom no mapa. No teclado, estas ações estão disponíveis através das teclas “+” e “-”, enquanto que no mouse isto é realizado através de um duplo-clique sobre a região onde se deseja ampliar;
- Magnifier** – tem o mesmo propósito do *Zoom Slider*, porém, a ampliação se dá por meio do desenho de um retângulo sobre a região de interesse.
- Modo de Exibição** – permite optar entre quatro possíveis modos de visão:
  - **Mapa** – exhibe as ruas da cidade;
  - **Satélite** – exhibe a foto de satélite da região;
  - **Híbrido** – combina os dois modos anteriores. O mapa das ruas é mostrado sobre as fotos de satélite.
  - **Ocultar/Exibir** – esta opção, disponibilizada através da ferramenta representada pelo ícone , permite ocultar o mapa ou foto de satélite e exibir apenas o grafo da malha viária.

Por último, no controle do “Modo de Exibição”, há uma pequena caixa informando a posição atual do mouse sobre o mapa, em termos de latitude e longitude.

Um clique com o botão direito do mouse sobre o mapa ativa um menu pop-up com ações disponíveis para o mesmo, exibidas na Figura 4.8. Seis dos sete conjuntos



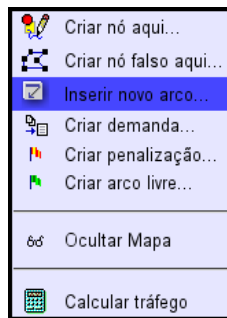
**Figura 4.7:** Interface da Aplicação - Visão do Mapa.

de dados que formam um projeto (vide Seção 3.2.1) podem ser alimentados a partir deste menu: nós, arcos, demandas, penalizações, arcos livres e nós falsos. A exceção fica por conta do semáforo, cuja opção para criação está disponível apenas no menu popup referente às avenidas, explicada a seguir.

### Representação Visual das Avenidas

No PET-Gyn, foram adotadas técnicas de Visualização de Informações com o objetivo de representar melhor os dados do tráfego. Em particular, foi utilizado um esquema de coloração das avenidas para indicar velocidades máximas permitidas ou velocidades médias computadas dos veículos, além de ícones para indicar a existência de condições especiais como semáforos e penalizações em cruzamentos. Os possíveis valores de cor para as velocidades máximas permitidas são descritos abaixo.

- **Vermelho** – avenidas cujas velocidades máximas legais são menores ou iguais a 20 km/h;
- **Laranja** – avenidas com velocidades permitidas acima de 20 km/h e menores ou iguais a 40 km/h;
- **Azul Ciano** – avenidas cujas velocidades máximas legais encontram-se acima de 40 km/h e menores ou iguais a 60 km/h;

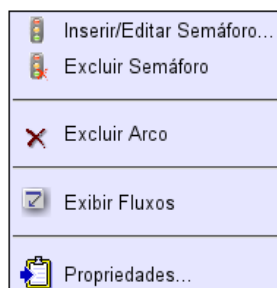


**Figura 4.8:** PET-Gyn – Menu com as opções do mapa.

- ■ **Verde** – avenidas com velocidades permitidas acima dos 60 km/h.

A visualização das velocidades médias de tráfego, computadas para cada avenida, segue o mesmo esquema de coloração acima descrito, com exceção da cor cinza, a qual é utilizada para indicar que o fluxo em equilíbrio de veículos ainda não foi computado. Também é possível filtrar essa visualização para mostrar apenas as avenidas (arcos) com velocidade média de tráfego abaixo da velocidade mínima permitida (o que indica possíveis gargalos no sistema de transporte).

Os arcos possuem um menu pop-up que dá acesso às funcionalidades dos mesmos. Um clique com o botão *esquerdo*<sup>1</sup> do mouse sobre um arco qualquer irá apresentá-lo, e suas opções podem ser observadas na Figura 4.9.






**Figura 4.9:** PET-Gyn – Menu com as opções do arco.




### Representação Visual de Intersecções de Avenidas

O sistema PET-Gyn reconhece quatro tipos de cruzamento, representando-os com diferentes ícones dependendo de sua natureza. Seus possíveis tipos são:

- **Simples** – intersecção comum entre duas avenidas. É representado pelo ícone

<sup>1</sup>Ao contrário do que acontece habitualmente, para o arco, o menu pop-up não aparece em resposta a um clique com o botão direito do mouse, mas sim com o esquerdo. Isto deve-se ao fato da API do GoogleMaps não disponibilizar um evento *rightclick* para um arco, apenas o evento *click*. Se, no futuro, esta característica for disponibilizada pela API, tal comportamento poderá ser alterado.

- **Com semáforo** – cruzamento no qual pelo menos um sinal controlador de tráfego está presente. É representado pelo ícone ;
- **Penalizado** – intersecção entre uma via não-preferencial e uma preferencial, não semaforizada. O tempo de percurso na via não-preferencial é aumentado devido ao fato dos carros que por ela seguem terem de esperar até que o fluxo na via preferencial se esgote, de forma a poderem realizar uma conversão ou continuarem o deslocamento. Este tipo de cruzamento é representado pelo ícone ;
- **Penalizado com Semáforo** – cruzamento entre uma via não-preferencial e uma preferencial, com penalização da via não-preferencial, e controlado por pelo menos um semáforo. É representado pelo ícone .

Além disto, duas pequenas marcas estão disponíveis para indicar tipos especiais de nós, que são aqueles que geram ou recebem demandas. Nós geradores de demandas são destacados com uma pequena marca verde, como por exemplo . Já os nós destino de demandas recebem uma pequena marca azul, como em . Se um nó for tanto origem quanto destino de demandas, ambas as marcas  estão presentes.

## 4.5 Exemplo de Uso

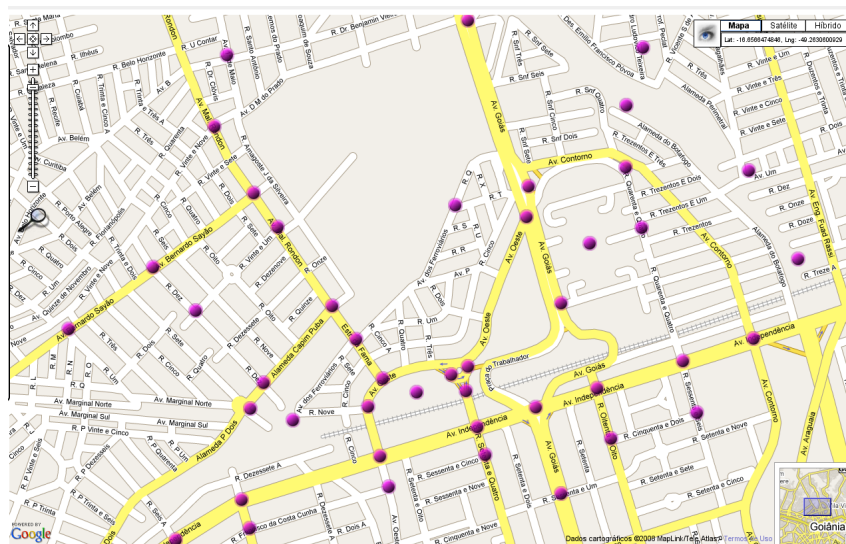
### 4.5.1 Criação de um Projeto

Para ilustrar o uso da ferramenta, vamos construir primeiramente um projeto de modelagem de uma região específica de Goiânia-GO. Os passos que devem seguidos para isto são descritos sucintamente a seguir. O projeto completo está implementado e disponível para estudo em <http://www.inf.ufg.br/~funcomp/>. É recomendável utilizar o navegador Web Mozilla FireFox para a sua visualização.

1. **Criar um projeto vazio.** Na barra de ferramentas, o usuário deve clicar no botão “Projetos” e, depois, na opção “Criar novo...”. Em seguida, precisa fornecer o nome do projeto (por exemplo, “Região A”) e clicar em “Ok”. Por fim, deve voltar ao botão “Projetos” e escolher “Região A” na lista para carregá-lo.
2. **Definir os nós.** Com o projeto vazio, o usuário deve escolher na barra de ferramentas a opção “Visão do Mapa”, a fim de inserir os nós representando as intersecções diretamente no mapa. Para isto, deve mover o mouse até o ponto onde deseja inserir o novo nó, clicar com o botão direito do mouse e escolher a opção “Criar nó aqui...”. A caixa de diálogo da Figura 4.10 será exibida. O usuário deve preencher os campos “Bairro”, “Número do Nó” e “Local” adequadamente. Os campos com

as coordenadas geográficas são automaticamente definidos e não precisam ser alterados. Em seguida, deve clicar no botão “Salvar” e repetir o processo quantas vezes forem necessárias, até que todos os nós desejados estejam definidos. A Figura 4.11 exibe o resultado final, com 44 nós criados.

**Figura 4.10:** PET-Gyn – Janela de edição nós.

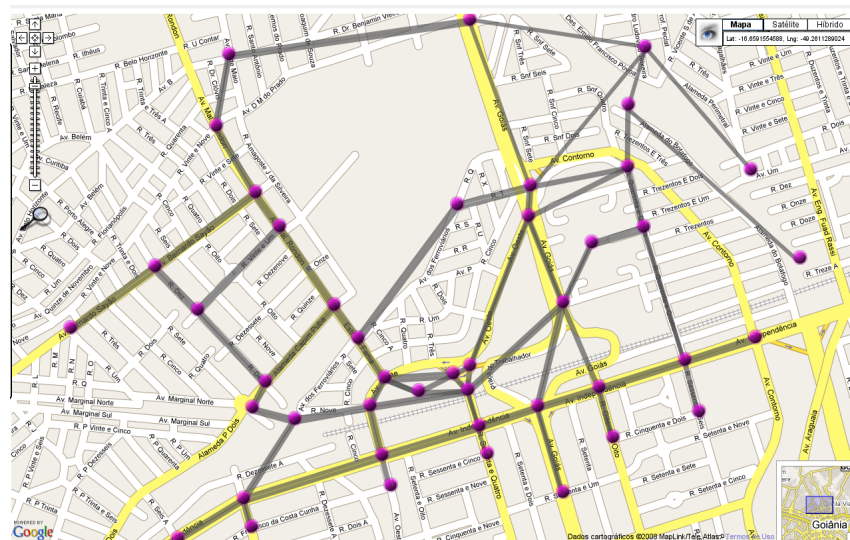


**Figura 4.11:** Exemplo de mapa com 44 nós inseridos.

3. **Criar os arcos.** Uma vez definidos os nós, podem ser inseridos os arcos que representam as avenidas. Para tanto, o usuário deve clicar com o botão direito do mouse sobre o nó origem do novo arco e escolher a opção “Iniciar arco aqui...”. Em seguida, deve clicar no nó destino do novo arco. A caixa de diálogo da Figura 4.12 será exibida. O usuário precisa definir os valores dos campos “Tipo”, “Comprimento”, “Velocidade Livre”, “Número de Faixas” e “Nome”, mantendo a opção Status como “Aberta”. Em seguida, deve clicar no botão “Salvar”. A Figura 4.13 exibe o resultado após a criação de 107 arcos (incluindo mão e contra-mão).
4. **Definir os arcos livres.** Conforme mencionado na Seção 3.3.1, é necessário definir quais são os caminhos e conversões permitidos na malha viária, usando *Arcos Livres*. Para tanto, o usuário deve clicar com o botão direito do mouse em qualquer

Inserir novo arco	
Tipo:	6 - Mão dupla com iteração, dominante
Nó Origem:	468 Bernardo Sayão com Mal. Rondon
Nó Destino:	472 Mal. Rondon com Rua 21
Comprimento:	75 metros
Velocidade Livre:	60 km/h
Nº de Faixas:	1.75
Nome:	Marechal Rondon, entre a Bernardo Sayão e a Rua 21
Status:	Aberta
<input type="button" value="Salvar"/> <input type="button" value="Cancelar"/>	

**Figura 4.12:** PET-Gyn – Janela de edição de arcos.




**Figura 4.13:** Mapa com 107 arcos criados.


local do mapa e escolher a opção “Criar arco livre...”. A caixa de diálogo da Figura 4.14 será exibida. Então, o usuário deve escolher os arcos origem e destino do arco livre e, em seguida, clicar em “Salvar”. O projeto “Região A” possui 150 destes registros.

5. **Definir as penalizações.** Penalizações são aplicadas em ruas/avenidas onde a conversão é permitida, porém o tempo de deslocamento dos veículos no arco é penalizado devido ao fato de tratar-se de uma rua não-preferencial. Para definir uma penalização, o usuário deve clicar com o botão direito do mouse sobre qualquer local do mapa e escolher a opção “Criar penalização...”. A caixa de diálogo da Figura 4.14 é exibida, mas, desta vez, para criar uma penalização. O usuário deve, então, escolher os arcos origem e destino da penalização e, em seguida, clicar em “Salvar”. O projeto “Região A” possui 22 destes registros.
6. **Inserir semáforos.** Para definir um semáforo no final de um arco, o usuário deve clicar com o botão esquerdo do mouse sobre o mesmo e escolher a opção

**Figura 4.14:** PET-Gyn – Janela de edição/criação de um arco livre.

“Inserir/Editar Semáforo...”. Na caixa de diálogo que surgir, o usuário deve inserir o fator de semáforo e clicar em “Salvar”. No total, existem 40 semáforos no projeto de exemplo.

Concluídos esses passos, a estrutura da malha viária está pronta. A próxima tarefa consiste em definir a *matriz de demandas* de veículos. Essa matriz representa todos os pares O-D (origem-destino) de viagens que uma certa quantidade de carros deseja realizar em um determinado horário do dia. Assim, por exemplo, o registro (330,488,385) significa que 385 veículos desejam deslocar-se entre os nós 330 e 488 da rede viária. Para especificar uma nova demanda, o usuário pode usar o menu popup do mapa (Figura 4.8) ou o botão  da tabela de demandas, na visão de tabelas. A Figura 4.15 apresenta a matriz de demandas da Região A com 224 registros inseridos;


Nós	Arcos		224 Demandas 														Penalizações				Arcos Livres				Semáforos				Nós Falsos								
	330	465	466	470	472	474	476	482	488	592	611	622	2060	2062	2064	2066	2068	#	330	465	466	470	472	474	476	482	488	592	611	622	2060	2062	2064	2066	2068	#	
330	0	10	3	2	1	105	5	41	385	130	4	45	14	15	60	2	135	957																			
465	15	0				8	1	36	70	30	2	2	5	5	8	1	30	242																			
466	30	120				40	6	15	130	60	1	35	5	13	52	3	85	601																			
470	1	2	3	0	0	1	0	0	2	3	0	2	1	0	1	0	1	17																			
472	2	3	5	0	0	1	1	1	2	2	0	2	1	2	1	0	3	27																			
474	50	5	10	0	0	0	4	44	295	60	3																										
476	2	2	4	0	1	1	0	3	3	0	1	5	1	3	1	0	4	31																			
482	305	5	1	0	1	39	0	0	130	0	2	0	0	1	25	0	0	509																			
488	45	25	15	0	0	150	2	15	0	10	7	35	0	4	50	2	45	411																			
592	37	40	95				2	15	110	0	10	369	7	3	32	3	125	983																			
611	5	5	5	1	2	10	2	6	20	20	0	20	3	4	15	1	10	129																			
622	65	0	40	3	5	0	0	45	180	500	10	0	50	25	50	3	5	981																			
2060	35	10	15	1	5	20	2	0	20	60	4	17	0	3	2	2	0	196																			
2062	25	1	15	1	1	25	1	18	85	60	2	30	2	0	10	1	0	277																			
2064	50	1	11	0	1	10	1	33	50	85	2	5	10	3	0	1	5	268																			
2066	10	4	5	0	0	6	0	3	10	4	1	4	1	1	5	0	10	64																			
2068	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0																			
#	677	233	252	20	26	546	27	275	1492	1024	49	582	106	86	362	20	568	#																			

**Figura 4.15:** PET-Gyn – Matriz de Demandas.

O sistema agora possui todos os dados necessários para o cálculo.

## 4.5.2 Executando a Simulação e Analisando Resultados

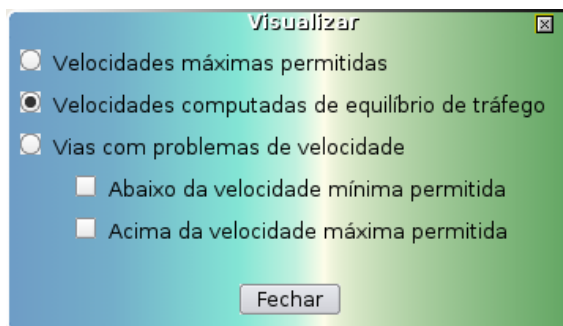
Para realizar a simulação de um projeto, o usuário deve definir o tipo de PET (Seção 2.1.2), em “Projetos → Tipo de PET” e, na barra de ferramentas, escolher a opção

“Calcular Tráfego” . A Figura 4.16 exibe o resultado da simulação para a “Região A” do exemplo anterior, usando o modelo EU.



**Figura 4.16:** Resultado do Cálculo da Região A.

Como descrito na Seção 4.4.3, as cores das avenidas indicam as velocidades médias dos veículos que por ela trafegam quando o sistema de tráfego projetado entra em equilíbrio. A Figura 4.16 sugere um possível gargalo nas proximidades da Praça do Trabalhador, onde, em quase todas as avenidas, os veículos estão deslocando-se abaixo dos 20 km/h. No entanto, é possível que as velocidades máximas permitidas efetivamente não possam ultrapassar esse valor.




**Figura 4.17:** PET-Gyn – Menu de Visualizações.

Para confirmar isso, o usuário deve executar a ferramenta “Menu de Visualizações”, abrindo a caixa de diálogo ilustrada na Figura 4.17. Em seguida, deve selecionar as opções “Vias com problemas de velocidade” e “Abaixo da mínima permitida”. Os arcos que não estão com problemas são ocultados, ficando visíveis apenas aqueles que atendam este critério. Como pode ser observado na Figura 4.18, estas avenidas realmente apresentam um gargalo, juntamente com algumas outras nas proximidades.




**Figura 4.18:** Mapa com filtro de visualização de vias com problemas de velocidade ativado. São exibidas apenas as vias com velocidade média de tráfego computada abaixo da velocidade mínima permitida.

### 4.5.3 Explorando Alternativas para a Rede Viária

Conforme ilustrado na Figura 4.16, há um gargalo no trânsito na proximidade da Praça do Trabalhador. O Pet-Gyn pode ser utilizado para explorar diversas alternativas visando minimizar esse problema. A seguir, é demonstrada uma solução simplista para o mesmo. Inicialmente, contudo, é recomendável duplicar o projeto e trabalhar na sua cópia. A cópia de um projeto é realizada clicando-se no botão “Projetos” da Barra de Ferramentas e, em seguida, em “Salvar como...” . Para o exemplo em estudo, vamos chamar o novo projeto de “Região A – Cópia”.

A solução aqui discutida para o problema de velocidade do tráfego consiste em criar duas novas avenidas de mão-dupla, conectando avenidas já existentes.

Para verificar o efeito dessa modificação, deve-se calcular o novo tráfego e comparar os resultados com o tráfego do projeto original, clicando-se no botão “Comparar cálculos” . Na lista que será exibida, o usuário deve marcar os dois cálculos que deseja comparar e, em seguida, clicar em “Executar”. A Figura 4.19 exibe a comparação entre os dois projetos, mostrando os fluxos e os tempos nos arcos em ambos os projetos, com indicação de melhora ou piora usando cores e um gráfico de pizza.

Nesta simulação, o efeito do acréscimo das duas avenidas foi uma melhora (tempos menores de percurso) em sete arcos e nenhuma piora nos tempos. Os arcos cujos tempos ficaram menores estão destacados em verde, conforme mostra a Figura 4.20. Na região próxima à Praça do Trabalhador, dois arcos melhoraram.

Obviamente, outras alternativas para a melhoria do tráfego poderiam ser experimentadas, tais como a duplicação de faixas das avenidas, aumento do tempo aberto ou

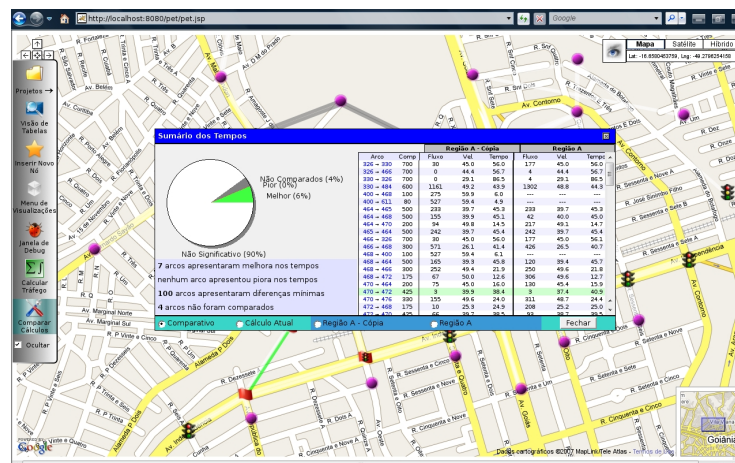


Figura 4.19: Comparação entre dois projetos.



Figura 4.20: Arcos com melhora nos tempos.

retirada de semáforos, aumento das velocidades máximas permitidas, entre outras.

#### 4.5.4 Modelando a Emissão de Poluentes

Uma vez computados os fluxos de veículos, torna-se possível estimar sua emissão de poluentes. Para isso, são usadas funções matemáticas que relacionam as emissões com as velocidades médias dos veículos em cada trecho (arco) da malha viária. No presente trabalho, foram usadas as funções apresentadas no Relatório Síntese do projeto *Redução das Deseconomias Urbanas com a Melhoria do Transporte Público*, do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA para a Associação Nacional de Transportes Públicos - ANTP (1998)[36], com o objetivo de estimar as emissões dos quatro principais poluentes nocivos à saúde: hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) e materiais particulados (MP):

- HC (g/km):  $-0.28 + \frac{62.48}{V}$
- CO (g/km):  $-4.51 + \frac{727}{V} + 1.34^{-3}V^2$
- NO<sub>x</sub> (g/km):  $1.03 + 7.477^{-5}V^2$
- MP (g/km):

onde V é a velocidade média no arco.

Esses valores de emissões referem-se à média de poluentes emitidos por apenas um veículo no arco em análise. Para calcular a emissão no arco, deve-se multiplicar esse valor pelo fluxo de automóveis que por ele trafega, no período de uma hora. A soma dos valores das emissões em todos os arcos fornece a poluição total gerada pelo trânsito.

## Avaliação do Trabalho

---

Neste capítulo é apresentada uma avaliação qualitativa da ferramenta descrita no Capítulo 4, com o objetivo de verificar se a abordagem interativa e as visualizações propostas são capazes efetivamente de auxiliar a tomada de decisões por parte de profissionais responsáveis pelo tráfego urbano. Deseja-se, sobretudo, verificar se a abordagem, através da ferramenta implementada, oferece:

- a possibilidade de simular de situações reais do tráfego urbano;
- respostas rápidas e precisas a questões levantadas por especialistas da Engenharia de Tráfego;
- visualizações intuitivas e de fácil compreensão; e
- manuseio simplificado dos dados e dos recursos interativos, demandando pouco esforço de treinamento.

Devido ao público-alvo ao qual a ferramenta se destina, não foi possível ter acesso a uma quantidade significativa de profissionais que dispusessem de tempo suficiente para a realização de um experimento controlado. Em função disso, foi adotada uma abordagem de avaliação informal, análoga à Avaliação Heurística [50, 42]. Os modos de composição e condução da avaliação são detalhados a seguir.

### 5.1 Configuração da Avaliação

A avaliação realizou-se através de entrevistas, nas quais estavam presentes os *avaliadores* – profissionais responsáveis pela qualificação do sistema – e os *entrevistados*, os quais eram o autor do presente trabalho e seus orientadores.

#### 5.1.1 Escolha dos Avaliadores

Foram escolhidos dois grupos de avaliadores, compostos por profissionais direta ou indiretamente responsáveis pelas políticas de trânsito da capital. Todos estes profis-

sionais autorizaram a divulgação de suas identidades, e seus dados são apresentados a seguir.

O primeiro grupo foi composto pela Dra. Márcia Helena Macêdo, professora adjunta da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (UFG). A profa. Macêdo tem mestrado e doutorado na área de transporte. Trabalhou entre 1980 e 1992 no Departamento de Estradas e Rodagens de Goiás (DERGO) e foi, durante o período de julho de 2003 a novembro de 2007, gerente de Desenvolvimento da Gestão na Secretaria de Transporte e Mobilidade Urbana do Ministério das Cidades, em Brasília-DF.

O segundo grupo foi composto por profissionais da COMDATA – Companhia de Processamento de Dados do Município de Goiânia. Esta empresa presta serviços de consultoria de negócios em informática para os diversos órgãos da prefeitura da capital goiana. Entre esses serviços, encontra-se o de geoprocessamento. Os dois profissionais presentes foram:

- **Flávio Yuassa.** Com formação em GeoProcessamento e coordenador do Departamento de GeoProcessamento da Câmara Técnica de Planejamento.
- **Sérgio Wiederhecker.** Arquiteto e especialista em docência universitária, responsável pelo desenho de mapas no Departamento de GeoProcessamento.

### 5.1.2 Preparação e Realização das Avaliações

As entrevistas foram marcadas com os grupos separadamente. Cada entrevista consistiu de uma apresentação que expôs as motivações do trabalho, uma breve descrição da modelagem matemática usada e uma explicação das telas e dos recursos da ferramenta descrita no Capítulo 4, sendo a mesma executada em um notebook ligado a um projetor.

O notebook utilizado tinha as seguintes configurações: HP Pavilion DV6045NR, com processador AMD Turion<sup>64</sup>X2 de 1.8Ghz por núcleo, tela WideScreen de 15.4” com resolução de 1280x800, 2Gb de RAM, placa de vídeo NVIDIA GeForce Go 6150 com 256Mb de memória TurboCache<sup>TM</sup> dedicada, HD de 120Gb e Windows<sup>XP</sup>.

Foi adotado também um questionário, o qual foi preenchido pelos entrevistadores à medida que a avaliação era realizada. As perguntas nele contidas eram:

1. “Como você vê o possível uso de algum software de simulação de tráfego e apoio a decisões por especialistas da área?”
2. “Quais recursos do PET-Gyn são interessantes e poderiam ser úteis?”
3. “Quais recursos novos seriam desejáveis para o PET-Gyn?”
4. “Quais pontos fracos você identificou no PET-Gyn?”

5. “Como você vê o possível uso do software PET-Gyn por especialistas de tráfego em geral?”

Durante a demonstração da ferramenta foram exibidas três simulações, referentes a uma área da região nordeste da capital goiana. Tal região situa-se entre o Setor dos Funcionários, Balneário Meia-Ponte, Loteamento Shangrilá, Jardim Guanabara e Praça da Bíblia, todos ao norte da Avenida Independência, com cerca de 180.000 habitantes. Os nomes e as características de tais simulações são:

- **Projeto “Região B”**. Este projeto representa a estrutura atual da rede viária, e é composto por 193 nós, 545 avenidas, 1222 demandas e 114 semáforos.
- **Projeto “Região B – Marechal Rondon”**. A estrutura da rede viária foi alterada, transformando a avenida Marechal Rondon em uma via de mão única, enquanto a rua Amagoste J. da Silveira torna-se sua mão contrária.
- **Projeto “Região B – Agropecuária”**. Algumas avenidas ao redor do Parque Agropecuário de Goiânia foram fechadas de modo a estimar as consequências no tráfego da exposição agropecuária que é realizada anualmente no mês de maio.

Os três projetos usaram a mesma matriz de demandas. O objetivo foi mensurar e demonstrar quais são as consequências no trânsito das duas modificações, em relação a como este se comporta atualmente. Recursos de comparação da ferramenta foram utilizados durante as avaliações.

Em função da viabilidade de locomoção e da disponibilidade de tempo dos avaliadores, a primeira avaliação foi realizada no Laboratório de Visualização de Informações e Otimização Interativa do Instituto de Informática da UFG, enquanto a segunda deu-se nas dependências da COMDATA.

## 5.2 Resultados Obtidos

### 5.2.1 Primeira Avaliação

A professora Márcia Helena elogiou a iniciativa de desenvolver tecnologias de simulação de tráfego urbano, pois esse é um problema muito complexo e exige um grande esforço de implementação de sistemas. Além disso, em suas palavras, “há pouca coisa em desenvolvimento pelas instituições de pesquisa no Brasil na área de planejamento urbano”, e as ferramentas desenvolvidas no exterior não se adequam à realidade do trânsito brasileiro, sendo também pouco intuitivas.

Quanto aos itens enumerados no questionário, a Profa. Márcia Helena fez os seguintes comentários:

1. O uso de software de simulação para o apoio a profissionais da área é importante, mas seria interessante aumentar o escopo do projeto em direção ao conceito de “mobilidade urbana” e não apenas de equilíbrio de tráfego. Segundo a professora, somente 30% do trânsito urbano é composto efetivamente por carros particulares, havendo uma grande influência de motos, caminhões, ônibus do transporte público, bicicletas e pedestres no tráfego. O ideal seria que a ferramenta permitisse tanto a simulação de apenas um “modo de locomoção” quanto de vários modos em conjunto;
2. Os recursos de comparação de projetos (propostas distintas para uma rede viária) do PET-Gyn são interessantes para profissionais que trabalham com análise de tráfego, principalmente na análise de Pólos Geradores de Viagens – PGV<sup>1</sup>;
3. Uma nova característica desejável a ser disponibilizada no PET-Gyn seria a possibilidade de se incorporar outras formas de transporte, tais como veículos leves sobre trilhos (VLT), corredores exclusivos para ônibus, ciclovias, etc., de acordo com o conceito mais amplo de mobilidade urbana já mencionado;
4. As visualizações são boas e a ferramenta é de fácil manuseio, mas alguns aspectos de utilização da mesma poderiam ser melhorados:
  - Novos arcos recém inseridos poderiam ser desenhados em uma cor diferente para facilitar o destaque;
  - O Hint flutuante – uma pequena janela que exibe informações sobre um nó – deveria ser substituído por uma barra de informações/status fixa na parte inferior da tela, uma vez que no momento este aparece muito próximo ao nó a que se refere, sobrepondo itens no mapa;
  - Nós origem e/ou destino de demanda deveriam exibir seus valores de demanda no Hint (ou futuramente na barra de status, se esta for implementada);
5. O software PET-Gyn tem potencial para ser uma ferramenta útil aos profissionais da área.

### 5.2.2 Segunda Avaliação

Os avaliadores do segundo grupo também parabenizaram a iniciativa dos pesquisadores em desenvolver uma ferramenta para modelagem e simulação de tráfego urbano. Seus comentários, vinculados às questões do questionário, foram os seguintes:

---

<sup>1</sup>Os Pólos Geradores de Viagens são empreendimentos capazes de gerar uma grande quantidade de demandas de deslocamento, tais como shopping centers, hipermercados, hospitais, universidades, estádios, etc.). Vide <http://redpgv.coppe.ufrj.br/>

- Uma ferramenta nessa área é extremamente necessária, principalmente no contexto atual, no qual as condições do tráfego deterioram-se continuamente, sendo portanto elogiável a iniciativa de se investir nesse campo;
- As funções de modelagem e simulação do PET-Gyn são importantes, pois a atividade de modelagem e simulação do tráfego é inviável de ser realizada manualmente. Elas permitem estimar previamente os impactos de uma proposta de modelagem antes que seja efetivamente implantada, evitando uma série de contratempos;
- Seria interessante incluir mais recursos para consultas no PET-Gyn, elaboradas de forma dinâmica. Um exemplo seria a exibição de todas as ruas com certa velocidade máxima permitida;
- O PET-Gyn, assim como a maioria dos softwares hoje disponíveis – se não todos – trabalha com domínios de tempo discretos. Ou seja, uma simulação é válida apenas para um certo horário do dia, não permitindo que o sistema “evolua” ao longo das horas. Foi sugerida a possibilidade da utilização de domínios contínuos, onde os parâmetros da simulação fossem descritos por funções;
- Mais do que para engenheiros do tráfego, a ferramenta pode ser útil para outros setores da administração da capital goiana, por exemplo, para os setores responsáveis pela realização de intervenções visando, por exemplo, o asfalto de uma rua, aprovação de abertura de escolas, alteração de sentido de avenidas e para atividades de urbanismo em geral.

Os avaliadores da COMDATA também comentaram que a dificuldade de se utilizar um software como esse encontra-se na alimentação dos dados necessários às simulações, feita de forma manual. Eles sugeriram, assim, a possibilidade de desenvolver algum mecanismo de coleta automática dos dados como, por exemplo, através do uso de GPS em táxis e ônibus, etc.

### 5.3 Comentários Gerais

De um modo geral, as avaliações indicaram inequivocamente uma carência de ferramentas de simulação adequadas à realidade brasileira do trânsito urbano. Todos os avaliadores demonstraram grande interesse no presente estudo e também o desejo de que o mesmo não seja interrompido com a defesa desta dissertação.

Além disso, os entrevistados avaliaram positivamente as visualizações propostas. Salvo alguns pequenos ajustes pontuais, a ferramenta foi considerada de fácil manuseio e bastante interativa, demandando pouco esforço em seu uso.

Esses comentários indicam que sistemas sofisticados podem ser desenvolvidos e distribuídos por meio de aplicações RIA. A ferramenta PET-Gyn, implementada usando

tecnologias AJAX, foi capaz de lidar com um volume considerável de dados, mantendo um desempenho satisfatório. Tal desempenho, porém, talvez não possa ser alcançado se a ferramenta for executada em máquinas muito antigas ou ligadas a redes não muito rápidas. O conceito RIA, portanto, não é uma panacéia e seu uso deve ser cuidadosamente estudado.

### 5.3.1 Pontos importantes

Durante a evolução do presente trabalho, foram levantados alguns pontos importantes que devem ser salientados:

- O modelo **EU** é usado para representar o fluxo rodoviário real. No entanto, esse modelo não deve ser tomado como uma medida exata do comportamento dos motoristas, pois trata-se de uma aproximação sujeita a imprecisões inerentes à modelagem matemática e à medição dos fluxos reais de veículos.
- Uma falha ainda presente no PET-Gyn é que não foi implementada integralmente a opção de penalização, a qual expressa a dificuldade relativa em certas conversões (por exemplo, à esquerda numa interseção com rua de mão dupla). Isso está planejado como trabalho futuro.
- Outra consideração importante é que o fluxo simulado sobre uma dada avenida raramente é o fluxo somente na via em exame; comumente um arco no modelo representa duas ou mais vias entre os nós inicial e final, já que o nó representa de fato uma pequena região sob o mapa, e não somente um ponto.
- Se fosse preciso um controle mais sofisticado sobre objetos geométricos, a adoção de um SGBD geográfico, como o PostgreSQL (Seção 3.4.1), com sua extensão PostGIS, seria mais recomendada. No entanto, como isto não mostrou-se necessário, a adoção de um SGBD relacional atendeu às necessidades. Note que aplicações SIG para a análise de padrões de tráfego – Sistemas de Informação Geográfica – são do tipo cartográficas. Elas, porém, podem ter uma representação baseada em campos de um SGBD relacional, desde que existam funções na aplicação capazes de tratar estes objetos georeferenciados.
- Uma característica interessante a ser disponibilizada futuramente seria permitir que um mesmo projeto tivesse duas ou mais matrizes de demandas, de modo a simular melhor a variação de tráfego durante o dia, sem necessidade de criar cópias do projeto original.
- A modelagem de uma região envolve definir todos os elementos – nós, arcos, semáforos, etc. – que compõem um projeto de tráfego, conforme descrito na Seção 3.2.1. Conforme observado pelos próprios avaliadores, esse é um processo trabalhoso que

pode demandar um tempo considerável. Faz-se necessário, portanto, desenvolver mecanismos que permitam importar tais informações de forma automática de outros sistemas ou base de dados. Outra possibilidade seria desenvolver formas de possibilitar a entrada desses dados de maneira mais simplificada.

- A tecnologia para a visualização de mapas adotada, o GoogleMaps, permite projetar mapas de ruas sobre fotos de satélite. No entanto, a sincronia entre ambos deixa um pouco a desejar, uma vez que o mapa de ruas aparece ligeiramente deslocado em relação às fotos. Uma solução para este problema seria a adoção de uma outra base de dados de mapas ou aguardar que a empresa Google Inc resolva essa diferença.

---

## Conclusão

---

O presente trabalho propôs uma arquitetura de software para apoio à decisão na análise e simulação de tráfego urbano. Ela define uma modelagem matemática baseada na computação dos modelos **EU** e **OS**, com funções de latência ajustadas para a realidade do trânsito brasileiro. A arquitetura também prevê uma interação via *Web* e o uso de visualizações interativas que facilitam as atividades de modelagem, simulação e análise de projetos de tráfego. Até onde sabemos, essas e outras características da arquitetura descrita no Capítulo 3 são inéditas no escopo das ferramentas tradicionais da engenharia de tráfego.

A modelagem matemática necessitou de soluções específicas para tratar as conversões permitidas no trânsito. No caso foi definido o conceito de *Arcos Livres*, e especificada uma transformação que converte um grafo de rede viária em outro que possui apenas caminhos válidos, para a computação dos caminhos mínimos. Esse processo é uma contribuição do trabalho que, por si só, representa uma interessante área de pesquisa que pode continuar a ser explorada.

A arquitetura prevê formas de armazenar informações necessárias para a simulação de obras de engenharia do trânsito da cidade e mecanismos que permitem estimar o impacto de situações temporárias (por exemplo, a interdição de uma avenida para obras ou por causa de um acidente) ou permanentes (como mudanças do sentido de uma ou mais vias, retirada ou colocação de semáforos, etc).

Foi implementada uma aplicação DSS fundamentada na arquitetura proposta, chamada de PET-Gyn. Esta aplicação usa a API do GoogleMaps para gerenciar os objetos geográficos (mapa da cidade e regiões adjacentes). Ela emprega também técnicas de visualização de informações, como desenho de grafos em cores, para apresentar diversas informações acerca do trânsito. A ferramenta foi desenvolvida utilizando apenas tecnologias livres e está disponível à sociedade para utilização e melhoria. Uma instância da mesma pode ser acessada – preferencialmente com o FireFox – no endereço <http://www.inf.ufg.br/~funcomp> e exibe dados do tráfego urbano de uma região de Goiânia.

As avaliações realizadas com a ferramenta apontam que a mesma pode ser útil

aos profissionais da engenharia de tráfego. Sugestões de melhoria foram inclusive feitas pelos avaliadores.

## 6.1 Contribuições

As principais contribuições do trabalho são, portanto, as seguintes:

- uma arquitetura genérica para o desenvolvimento de sistemas de suporte à decisão para a engenharia de tráfego;
- uma modelagem matemática, descrita junto com a arquitetura, que permite modelar de forma mais adequada o comportamento dos veículos nas redes viárias brasileiras;
- um Sistema de Apoio à Decisão implementado (PET-Gyn), que pode ser acessado remotamente e de forma distribuída, permitindo o trabalho colaborativo.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros dessa pesquisa, propõem-se:

- permitir que um mesmo projeto tenha duas ou mais matrizes de demandas, de modo a simular melhor a variação de tráfego durante o dia, sem necessidade de criar cópias do projeto original;
- explorar alternativas para as funções  $t_a$ , utilizando métodos numéricos que permitam encontrar funções mais precisas de forma automática.
- permitir atribuir pesos para as avenidas, de forma a simular a preferência subjetiva dos motoristas em relação a certos caminhos, muitas vezes não ótimos;
- completar a implementação de penalizações no PET-Gyn;
- para mapas muito grandes, com regiões modeladas desconexas, seria interessante computar o equilíbrio de tráfego para cada região separadamente, e não como um único cálculo de todo o sistema;
- utilizar o PostGIS para analisar aspectos interessantes do ponto de vista da pesquisa de banco de dados, como o uso de indexação e consulta espacial e
- disponibilizar a ferramenta documentada como software livre e desenvolver novas funcionalidades para melhorar a interação, simulação e visualização com os dados georeferenciados.

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] ADOT ARIZONA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION, I. T. D. **Traffic Engineering - What? Why? How?** former Arizona Highway Department.
- [2] AG, P. P. T. V. **Verkehr in städten - simulation.** German for “Traffic in cities - simulation”.
- [3] ALEXANDRE, D. S; AO MANUEL R. S. TAVARES, J. **Factores da percepção visual humana na visualização de dados.** CMNE/CILAMCE, June 2007.
- [4] ARAGÓN, F. R. C; LEAL, J. E. **Alocação de fluxos de passageiros em uma rede de transporte público de grande porte formulado como um problema de inequações variacionais.** Pesquisa Operacional, 23(2):235–264, Aug. 2003.
- [5] ARCHER, J. **Developing the potential of micro-simulation modelling for traffic safety assessment.** 13th ICTCT workshop, Corfu, 2000.
- [6] AREZKI, Y.; VAN VLIET, D. **A full analytical implementation of the partan/frank-wolf algorithm for equilibrium assignment.** Transportation Science, 1(24):58–62, 1990.
- [7] BECKMANN, M; MCGUIRE, C; WINSTEN, C. **Studies in the Economics of Transportation.** 1956.
- [8] BEZ, E. T. **Procedimento de Representação de Soluções em Otimização Global: Aplicação em Modelos de Interação Espacial.** PhD thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [9] BISPO, C. A. F. **Uma análise da nova geração de sistemas de apoio à decisão.** Master's thesis, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1998.
- [10] BLOY, K. **An investigation into some aspects of braess paradox.** Technical report, Vela VKE Consulting Engineers, Oct. 2006.
- [11] BRAGA, A; PEREIRA, L. A. A; SALDIVA, P. H. N. **Poluição atmosférica e seus efeitos na saúde humana.** Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os Próximos Vinte Anos - Campinas, SP, Brasil., 2002.

- [12] CARD, S. K; MACKINLAY, J. D; SHNEIDERMAN, B. **Readings in Information Visualization - Using Vision to Think**. Morgan Kaufmann, Jan. 1999.
- [13] CASSETTA, E. **Transportation Systems Engineering: Theory and Methods**. Springer, 2001.
- [14] CHANGIZI, M. A; ZHANG, Q; SHIMOJO, S. **Bare skin, blood and the evolution of primate colour vision**. *biology letters*, p. 217–221, Feb. 2006.
- [15] CHUDAK, F. A; DOS SANTOS ELEUTERIO, V; NESTEROV, Y. **Static traffic assignment problem - a comparison between beckmann (1956) and nesterov and de palma (1998) models**. 7th STRC - Swiss Transport Research Conference, Monte Verità, Ascona, Sep. 2007.
- [16] CORMEN, T. H; LEISERSON, C. E; RIVEST, R. L; STEIN, C. **Algoritmos: Teoria e Prática**. Editora Campus, 2 edition, 2002.
- [17] COSTODIO, J. **Problema de equilíbrio em redes de transporte. comparação entre o método do gradiente projetado e o método das combinações convexas**. Master's thesis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- [18] DA SILVA, P. C. M. **Elementos dos sistemas de tráfego**. Technical report, Universidade de Brasília - Faculdade de Tecnologia - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Área de Transportes, Mar. 2001.
- [19] DE ARAÚJO, D. R. C. **Comparação das simulações de tráfego dos modelos saturn e dracula**. Master's thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
- [20] DE DIOS ORTÚZAR, J; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. John Wiley and Sons, 3 edition, 2001.
- [21] DE OLIVEIRA LOPES FILHO, J. I. **Pós-avaliação da previsão de demanda por transportes no município de fortaleza**. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará, 2003.
- [22] DUIJN, M; IMMERS, L. H; WAALDIJK, F. A; STOELHORST, H. J. **Gaming approach route 26: a combination of computer simulation, design tools and social interaction**. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 6, no. 3, 2003.
- [23] EICHORN, J. **Understanding AJAX: Using JavaScript to Create Rich Internet Applications**. Prentice Hall, Aug. 2006.
- [24] FENABRAVE. **Informativo fenabreve - emplacamentos**. [http://www.tela.com.br/dados\\_mercado/emplacamentos/index.asp?coditem=1](http://www.tela.com.br/dados_mercado/emplacamentos/index.asp?coditem=1), Feb. 2008. Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores.

- [25] FIREBASE. **Quinto firebird developers day**.  
<http://www.firebirddevelopersday.com.br/fdd/contato.html>, July 2008.
- [26] FRANK, M. **The braess paradox**. *Mathematical Programming*, 1(20):283–302, Dec. 1981.
- [27] FREITAS, R. N. **Avaliação dos vazios existentes na macrozona urbana de são José dos campos, sp, em 2000: Um estudo de caso**. Master's thesis, Universidade do Vale do Paraíba, 2004.
- [28] GALLO, R; GALVAO, V. Q. **área central de sp perde moradores, e periferia incha**. *Folha de São Paulo*, 18/02/2008, Feb. 2008.
- [29] GEBERT, I. **Open-source database management systems in small and medium-sized companies**. Technical report, University of Rostock, Sep. 2003.
- [30] GOBBO, A. F. **Proposta de aplicação de sistemas de inferência neuro-fuzzy para otimização de tráfego**. Master's thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica do Estado do Paraná, Mar. 2005.
- [31] GOOGLE. **Google maps api concepts**.  
<http://code.google.com/apis/maps/documentation/index.html>, Jan. 2008. Developer documentation for the Google Maps API.
- [32] HENSHER, D. A; BUTTON, K. J. **Handbook of Transport Modelling**. 2002.
- [33] INSELBERG, A. **Multidimensional detective**. *IEEE Symposium on Information Visualization (InfoVis)*, p. 100, 1997.
- [34] INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES, U. O. L. **Dynamic route assignment combining user learning and microsimulation**.  
<http://www.its.leeds.ac.uk/software/dracula/index.html>, Mar. 2008.
- [35] INSTITUTE FOR TRANSPORT STUDIES, U. O. L. **Simulation and assignment of traffic to urban road networks**.  
<http://www.saturnsoftware.co.uk/index.html>, Mar. 2008.
- [36] IPEA. **Relatório síntese. redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público**. Technical report, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 1998.
- [37] IPEA/ANTP. **O transporte na cidade do século 21**. Technical report, XII Congresso Brasileiro de Transportes e Trânsito, 1999.

- [38] KIEFER, J. C. **Sequential minimax search for a maximum**. Proc. Am. Math. Soc., 4:502–506, 1953.
- [39] KOLATA, G. **What if they closed 42d street and nobody noticed?** The New York Times, Dec. 25, 1990.
- [40] LEEDS, U. O. **Smartest – final report for publication**. Technical report, Project Part Funded By The European Comission Under the Transport RTD Programme of the 4th Framework Programme, Jan. 2000.
- [41] LIEBERMAN, E; RATHI, A. K. **Revised Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report**, chapter 10. National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Committee on Traffic Flow Theory and Characteristics, 2001.
- [42] MARTINEZ, M. L. **Usabilidade no design gráfico de web sites**. GRAPHICA'2000 III International Conference on Graphics Engineering for Arts and Design and 14o Simpósio Nacional de Geometria Descritiva e Desenho Técnico, 2000.
- [43] NASCIMENTO, H. D. E FERREIRA, C. B. R. **Visualização de informações. uma abordagem prática**. XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação, 2005.
- [44] NETCRAFT. **April 2008 web server survey**.  
[http://news.netcraft.com/archives/2008/04/14/april\\_2008\\_web\\_server\\_survey.html](http://news.netcraft.com/archives/2008/04/14/april_2008_web_server_survey.html), Apr. 2008.
- [45] NOVAES, A. G. **Métodos de otimização: Aplicação aos transportes**. Editora Edgard Blücher, 1978.
- [46] PATRICKSSON, M. **The Traffic Assignment Problem: Models and Methods**. 1994.
- [47] PIGNATARO, L. J. **Traffic Engineering: Theory and Practice**. Prentice-Hall. Englewood Cliffs, EUA, 1973.
- [48] PINTO, A. B; DIÓGENES, M. C; LINDAU, L. A. **Quantificação dos impactos de pólos geradores de tráfego**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rio Grande do Sul, 2003.
- [49] POYARES, C. N. **Critérios para análise dos efeitos de políticas de restrição ao uso de automóveis em áreas centrais**. Master's thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2000.
- [50] PREECE, J; ROGERS, Y; SHARP, H. **Design de Interação**. Bookman, 2005.

- [51] REGAN, B. C; JULLIOT, C; SIMMEN, B; VIÉNOT, F; CHARLES-DOMINIQUE, P; MOLLON, J. D. **Fruits, foliage and the evolution of primate colour vision**. *Philos Trans R Soc Lond B Biol Sci.* (doi:10.1098/rstb.2000. 0773), 356(1407):229–283, Mar. 2001.
- [52] ROSEIRO, M. N. V. **Poluentes atmosféricos: Algumas conseqüências respiratórias na saúde humana**. VII Congresso Brasileiro de Saúde Coletiva, 2003.
- [53] SHEFFI, Y. **Urban transportation networks: Equilibrium analysis with mathematical programming**. Prentice-Hall, 1985.
- [54] SHNEIDERMAN, B. **The eyes have it: A task by data type taxonomy for information visualizations**. *Proceedings of IEEE Symposium on Visual Languages*, Boulder, CO, p. 336–343, Sep. 1996.
- [55] STOUT, B. **Smart moves: Intelligent pathfinding**. *Game Developer Magazine*, July 1997.
- [56] STRANDELL, T. **Open source database systems: Systems study, performance and scalability**. Master's thesis, University of Helsinki - Department of Computer Science, May 2003.
- [57] TOLFO, J. D. **Estudo comparativo de técnicas de análise de desempenho de redes viárias no entorno de pólos geradores de viagens**. Master's thesis, COPPE/UFRJ, Feb. 2006.