

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL

Carlos Eduardo Pereira de Quadros

*BioTraffic: um modelo comportamental bio-inspirado para a  
geometria veicular bidimensional*

Rio Grande  
2015

Carlos Eduardo Pereira de Quadros

*BioTraffic: um modelo comportamental bio-inspirado para a geometria veicular bidimensional*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

**Orientador: Prof. Dr. Alessandro de Lima Bicho**

Rio Grande

2015

Carlos Eduardo Pereira de Quadros

*BioTraffic: um modelo comportamental bio-inspirado para a geometria veicular bidimensional*

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional da FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Modelagem Computacional.

Examinado em : 28/05/2015

**Banca Examinadora**

---

Prof. Dr. Alessandro de Lima Bicho

C3/FURG

---

Prof. Dr. Léo Pini Magalhães

DCA/FEEC/Unicamp

---

Profa. Dra. Soraia Raupp Musse

Facin/PUCRS

---

Profa. Dra. Diana Francisca Adamatti

C3/FURG

## ***Agradecimentos***

*Agradeço a paciência da minha família e amigos pelos momentos de ausência, em especial meu pai Jorge Quadros, minha mãe Sheila Pereira e minha irmã Luna Pereira.*

*Ao orientador, prof. Alessandro de Lima Bicho, pela paciência, empenho, confiança e parceria durante a pesquisa.*

*Aos colegas dos Programas de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC) e em Computação (PPGComp), pelo compartilhamento de momentos bons, rodas de café, grupos de estudos e também de momentos tempestuosos (faz parte).*

*Aos docentes do PPGMC, professores Antônio Carlos da Rocha Costa, Bárbara Rodriguez, Diana Adamatti, Eder Gonçalves, Leonardo Emmendorfer, Nelson Lopes Duarte Filho, Sebastião Gomes e Silvia Botelho, pelos ensinamentos e compartilhamentos do conhecimento.*

*Às professoras Cátia Machado e Silvia Botelho, pelas contribuições realizadas na qualificação.*

*Aos colegas Bruno Freitas, Alisson Antunes e Vinicius Seus, pelo empenho durante o projeto de pesquisa relacionado a esta dissertação.*

*À banca examinadora formada pelos professores Léo Pini Magalhães, Soraia Raupp Musse e Diana Francisca Adamatti, por todas as contribuições realizadas para redação da versão final desta dissertação.*

*Ao prof. Heitor Vieira, pelos esclarecimentos de dúvidas oriundas da área de Engenharia de Tráfego.*

*Aos docentes do curso de Biblioteconomia da FURG, professores Rodrigo Carvalho e Fátima Maia, pelo apoio em relação à flexibilidade de horário no Laboratório de Tecnologia da Informação Documentária (LTI).*

*Aos colegas de LTI, Thaísa Gonçalves, Marco Aurélio Ribeiro Silva e Francieli Muck, pela parceria durante seus estágios.*

*À amiga Sabrina Corrêa, por suas sugestões na revisão final deste trabalho.*

## Resumo

Nós apresentamos um novo algoritmo para modelagem de tráfego baseado em métodos físico e biológico para simulações computacionais. O trabalho propõe um modelo de comportamento bio-inspirado capaz de simular a cinemática veicular bidimensional em ambientes virtuais, tanto em vias urbanas quanto em rodovias. A principal ideia é simular espaços desocupados por meio de marcadores distribuídos no ambiente. Estes marcadores abstratos identificam regiões livres para a circulação de veículos no cenário simulado. As equações da cinemática para o movimento do veículo são baseadas no raciocínio de terrenos, onde os marcadores fornecem informações sobre o espaço disponível e sobre o fluxo de veículos nas vias. Nós demonstramos a flexibilidade e a robustez do nosso modelo através de simulações em vias virtuais, comparando os resultados qualitativos e quantitativos com aqueles obtidos através de um método usualmente adotado para a simulação de tráfego.

Palavras-chave: animação comportamental. Colonização do espaço. Métodos de simulação. Modelos comportamentais. Raciocínio de terrenos. Simulação de tráfego. Sistemas multiagentes.

## **Abstract**

We present a novel algorithm for modeling realistic traffic using a hybrid model of both physical and biological method for computational simulations. The paper proposes a bio-inspired behavioral model able to simulate two-dimensional kinematic vehicle in virtual environments, both on urban streets and highways. The main idea is to simulate unoccupied spaces through markers distributed in the environment. These abstract markers identify free regions for the movement of vehicles in the simulated scenario. The kinematics equations for vehicle motion are based on the terrain reasoning by using these markers that, in addition to providing space information, also report the vehicular flow of road. We demonstrate the flexibility and robustness of our simulation model on synthetic roads, comparing the qualitative and quantitative results with a method usually adopted by traffic simulation.

**Keywords:** behavioral animation. Behavioral models. Multiagent systems. Simulation methods. Space colonization. Terrain reasoning. Traffic simulation.

*“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes”.*

*Isaac Newton*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>7</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>9</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>10</b>
1.1 Justificativa . . . . .	11
1.2 Objetivos . . . . .	15
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	15
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	15
<b>2 Trabalhos relacionados</b>	<b>17</b>
2.1 Modelos Microscópicos . . . . .	17
2.2 Modelos Macroscópicos . . . . .	25
2.3 Modelos Mesoscópicos . . . . .	27
2.4 Considerações finais sobre os trabalhos relacionados . . . . .	30
<b>3 Materiais e métodos</b>	<b>32</b>
3.1 Ferramentas para o desenvolvimento do modelo de simulação de tráfego . . . . .	32
3.2 Ferramenta para a validação . . . . .	34
3.3 BioCrowds - um modelo inspirado na Biologia . . . . .	35
3.3.1 O modelo de simulação de multidões . . . . .	36
3.3.2 Cálculo para a movimentação e orientação do agente . . . . .	38
3.3.3 Análise de colisão entre agentes . . . . .	40
3.3.4 Padrões comportamentais no modelo de multidões . . . . .	41
3.3.5 Considerações finais . . . . .	43

<b>4</b>	<b>O modelo para simulação do tráfego de veículos</b>	<b>44</b>
4.1	Implementação do modelo de simulação de multidões para linguagem multiagentes . . . . .	44
4.2	Do modelo de multidões para o tráfego de veículos . . . . .	48
4.3	Cálculo da orientação do agente . . . . .	50
4.4	Cálculo da velocidade do agente . . . . .	51
4.5	Considerações finais . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Resultados obtidos</b>	<b>57</b>
5.1	Geração do fluxo de entrada na via . . . . .	57
5.2	Dimensões do agente e do ambiente de simulação . . . . .	58
5.3	Análise da adaptação do modelo de tráfego de veículos com o modelo de multidões . . . . .	61
5.4	Comparação dos resultados com o simulador AIMSUN . . . . .	63
5.5	Validação do cálculo da velocidade do agente . . . . .	71
5.6	Análise das classes de veículos . . . . .	73
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>76</b>
6.1	Contribuições da pesquisa . . . . .	76
6.2	Trabalhos futuros . . . . .	77

## Lista de Figuras

1.1	O impacto emocional e econômico das viagens nas cidades [IBM, 2010]. . . .	14
2.1	Simulação utilizando autômatos celulares [NAGEL and SCHRECKENBERG, 1992]. . . . .	18
2.2	Linha do tempo - tipo de modelo, ano, pesquisador. . . . .	30
2.3	Classes de modelos para simulação do fluxo de tráfego [BEHRISCH, 2011]. . .	31
3.1	Área de trabalho do AIMSUN - El Masnou Espanha [AIMSUN, 2013a]. . . . .	36
4.1	<i>BioCrowds</i> - simulação com poucos marcadores. . . . .	46
4.2	<i>BioCrowds</i> - simulação com muitos marcadores. . . . .	47
4.3	Agentes e seus marcadores [BICHO, 2009]. . . . .	48
4.4	Agentes [BICHO, 2009]. . . . .	48
4.5	Modelo de Ackerman [OSÓRIO, 2009]. . . . .	49
4.6	Evolução da trajetória de agentes com dois tipos de marcadores: caminháveis e não-caminháveis [CASSOL, 2011]. . . . .	53
5.1	Headway de geração de fluxo dos veículos [AIMSUN, 2013b]. . . . .	57
5.2	Comprimento e largura para as classes de veículos VPP, VPM e VPG. . . . .	59
5.3	Editor de shapes da ferramenta NetLogo. . . . .	60
5.4	Restrição angular da orientação do veículo. . . . .	61
5.5	comportamento <i>BioCrowds</i> . . . . .	62
5.6	Ponderação escalada. . . . .	63
5.7	Ambiente de simulação no simulador de veículos AIMSUN. . . . .	64
5.8	Ambiente de simulação desenvolvido para o BioTraffic. . . . .	66

5.9	Distribuição Normal. . . . .	67
5.10	Fluxo de entrada de veículos na via. . . . .	68
5.11	Densidade de veículos na via. . . . .	69
5.12	Tempo de viagem dos veículos durante a simulação. . . . .	70
5.13	Velocidade média dos veículos na via. . . . .	71
5.14	Veículos de pequeno porte parados. . . . .	75

## Lista de Tabelas

5.1	Parâmetros de entrada no AIMSUN. . . . .	65
5.2	Parâmetros de entrada no <i>BioTraffic</i> . . . . .	65
5.3	Medidas das classes de veículos. . . . .	73
5.4	Resultados das simulações por classe de veículo. . . . .	74

# 1 Introdução

Quando o volume de veículos supera a capacidade da via, seja em uma pequena cidade ou em um grande centro, há a necessidade cada vez maior em estudar a dinâmica do tráfego, de modo a compreender e propor processos matemáticos, físicos ou estatísticos que a descreva, possibilitando a criação de métodos para simulação que possam estudá-la e propor soluções para minimizar problemas referentes ao trânsito.

A falta de planejamento para o tráfego de veículos pode produzir consequências indesejáveis, tais como: maior suscetibilidade dos motoristas a acidentes, redução da produtividade e da qualidade de vida das pessoas e prejuízo ao meio ambiente. O aumento do tráfego de veículos vem ocorrendo, principalmente, por dificuldades de soluções logísticas e de mobilidade pública, necessárias para os centros urbanos, mas há outros fatores que contribuem para o crescimento repentino da frota, tais como: incentivos fiscais, investimentos na cadeia produtiva da indústria automobilística e aumento do poder aquisitivo da população.

Há décadas pesquisadores em diferentes áreas estudam meios para simular o tráfego de veículos, buscando, a cada novo método proposto, um maior realismo. As primeiras representações computacionais apresentavam limitações, em parte devido às tecnologias existentes na época, que restringiam a pesquisa ao uso de *softwares* para a modelagem e a estudos de caso pontuais. Entretanto, verifica-se um crescente interesse em pesquisar alternativas que reproduzam os mais diferentes contextos presentes no trânsito, devido a maior disponibilidade de recursos computacionais atualmente disponíveis.

Os modelos para simular o tráfego de veículos possibilitam uma interessante relação entre custo e benefício referentes à aplicação. Por exemplo, no momento em que adotamos uma ferramenta que tem a possibilidade de informar previsões de infraestrutura viária decorrentes de um provável aumento da demanda, o custo necessário a essas futuras readequações poderá ser minimizado pelo simples fato de simular situações de tráfego que poderão acontecer.

Os principais pesquisadores envolvidos na área de estudo do presente trabalho são, em sua maioria, provenientes da Física, da Matemática e da Engenharia. Fundamentados em suas áreas, os pesquisadores objetivam reproduzir o fluxo de veículos através de metodologias oriundas da cinética dos gases, de autômatos celulares e de redes de Petri. Outras áreas de pes-

quiza também vêm propiciando investigação de novas metodologias, impulsionadas pela complexidade inerente da simulação do tráfego veicular. Alguns fatores favorecem a contribuição de áreas correlacionadas ao estudo de simulações de tráfego, como o maior poder computacional disponível nos últimos anos e as inúmeras aplicações em que podem ser empregadas as técnicas geradas nestas áreas de pesquisa.

Com o objetivo de apresentar uma nova proposição para simular o tráfego de veículos, o presente trabalho está organizado da seguinte forma:

- nas próximas seções são apresentadas a justificativa para o desenvolvimento da pesquisa e os objetivos geral e específicos do trabalho;
- o Capítulo 2 apresenta os principais trabalhos relacionados na área, organizados conforme uma taxonomia orientada aos modelos de simulação: microscópicos, macroscópicos e mesoscópicos;
- no Capítulo 3 são apresentadas as principais ferramentas utilizadas durante a pesquisa, tanto para o desenvolvimento quanto para a validação do modelo. Neste capítulo também é apresentado o modelo de multidões inspirado biologicamente, o *BioCrowds*, que serve como base para o presente trabalho;
- o Capítulo 4 apresenta a proposta metodológica adotada para desenvolver o modelo de tráfego de veículos, através de uma extensão do modelo de multidões apresentado no capítulo anterior;
- o Capítulo 5 descreve resultados coletados de experimentos realizados durante o desenvolvimento da pesquisa;
- no Capítulo 6 são apresentadas as considerações finais do trabalho, após simulações e análises realizadas na pesquisa.

Cabe destacar que, no decorrer da presente dissertação, os termos “agentes” e “veículos” serão tratados como sinônimos para uma melhor compreensão do texto.

## 1.1 Justificativa

De maneira geral, a proposição de um modelo computacional de simulação requer um considerável esforço de modelagem. No que se refere à proposição de modelos para a simu-

lação de tráfego, esta afirmação se mantém. Porém, uma vez implementados, os simuladores de tráfego permitem reproduzir várias situações do contexto, necessitando, na maioria dos estudos de caso, pouco esforço de modelagem por parte do pesquisador, além de um relativo baixo custo de operação [PORTUGAL, 2005]. Para que o resultado de um modelo de simulação de tráfego seja fidedigno, é necessário que as informações disponibilizadas para a simulação tenham a maior precisão possível do ambiente real, pois não adianta prover modelos robustos se as informações não condizem com a realidade dos ambientes simulados.

Segundo SEWALL [2011], a maioria dos métodos é projetada para explorar fenômenos específicos, tais como: *traffic jams* (congestionamento de tráfego), *stop-and-go effect* (efeito para-e-anda), *overtaking* (ultrapassagem) e *lane change* (mudança de faixa), ou ainda para avaliar as configurações da malha viária propostas pela engenharia de tráfego. Usualmente, a abordagem adotada para projetar modelos de simulação é a microscópica, que consiste em tratar o comportamento individualmente, tendo como característica principal sobre outros modelos o detalhamento de ações de cada agente (veículo).

Existe um número considerável de ferramentas para simulação de tráfego de veículos em ambientes virtuais. O esforço e os investimentos em ferramentas para a simulação de tráfego tem maior aporte nas empresas do que nas universidades, mas sabe-se que estes produtos, em sua maioria, só existem devido ao uso de métodos e modelos estudados e validados por pesquisadores no ambiente acadêmico.

O tema “mobilidade urbana” é um assunto investigado em vários países, mas os que mais sofrem as consequências da falta de uma política eficaz sobre este assunto são os países emergentes, que não tem infraestrutura viária suficiente para suportar o crescimento da demanda de veículos. O impacto dos problemas gerados pelo tráfego de veículos leva empresas, governo e academia a dedicarem esforços para reduzir ou mesmo extinguir estes efeitos. A gestão do tráfego nas cidades é de tamanha complexidade que não só a comunidade científica tem dedicado esforços para a produção de estudos de novos modelos e ferramentas para auxílio na resolução de problemas desta área, como também empresas renomadas, como a IBM<sup>1</sup> (*International Business Machines*) que, nos últimos anos, tem publicado pesquisas relacionadas ao impacto causado pelos congestionamentos nas principais cidades do mundo. Embasado no conceito de Sistema de Transporte Inteligente - ITS (*Intelligent Transportation System*), a empresa criou um modelo chamado “Modelo de Maturidade de Transporte Inteligente” (*Intelligent*

---

<sup>1</sup><http://www.ibm.com/br/pt/>

*Transport Maturity Model*) para classificar as cidades quanto à mobilidade urbana, sendo este apenas um dos diversos trabalhos realizados pela empresa relacionados a esta área.

Em 2010, uma pesquisa da IBM com 8.192 motoristas em vinte cidades espalhadas pelo mundo apontou que mais da metade dos motoristas concorda que o trânsito afeta negativamente a sua saúde, a sua vida profissional e pessoal [IBM, 2010]. Por exemplo, nos três anos anteriores à data da pesquisa o tráfego piorou, afirmaram os motoristas entrevistados.

A pesquisa foi formada por um questionário com as seguintes perguntas:

1. Qual o tempo do trajeto?
2. Quanto tempo você fica parado no trânsito?
3. Concorda que o valor do litro da gasolina é realmente alto?
4. O tráfego piorou?
5. O tráfego para-e-anda é um problema?
6. Dirigir causa algum estresse?
7. Dirigir faz com que você fique com raiva?
8. Dirigir afeta o seu trabalho?
9. Já estive em um tráfego tão ruim que teve que parar ou retornar?
10. Decidiu não realizar uma viagem devido ao tráfego?

A IBM compilou os dados da pesquisa, colocando-os em uma escala de 1 a 100, onde o maior número representa um maior prejuízo, gerando um índice classificado pelo impacto emocional e econômico das viagens nas cidades.

Pesquisas como esta identificam que se deve investir cada vez mais em modelos e ferramentas de simulação de tráfego para ter, além da possibilidade de gerenciamento, o poder de prever e prevenir acontecimentos inusitados, tais como o fato do atraso na inauguração do principal estádio da Copa do Mundo, em 2010, o *Soccer City*, em Johannesburgo/África do Sul<sup>2</sup>,

---

<sup>2</sup><http://globoesporte.globo.com/futebol/copa-do-mundo/noticia/2010/05/no-seu-primeiro-teste-soccer-city-tem-jogo-atrasado-pelo-transito.html>

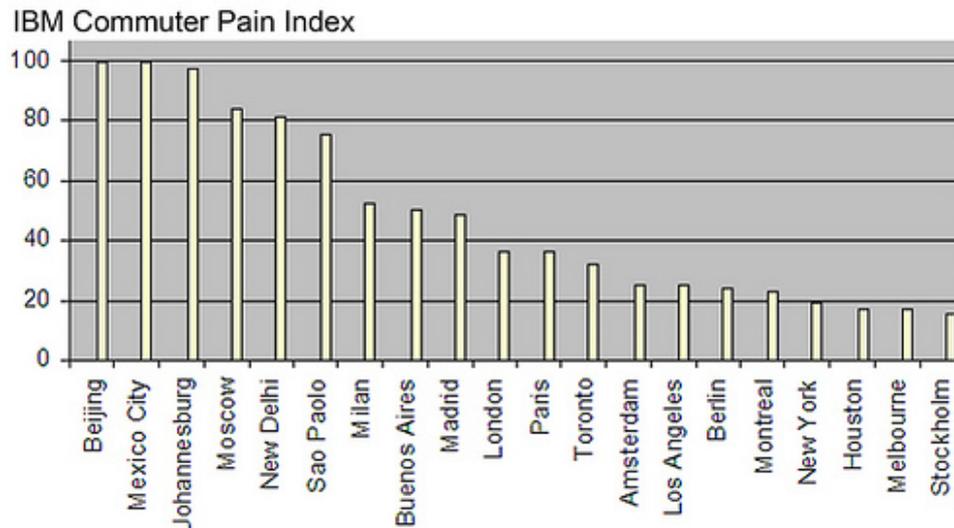


Figura 1.1: O impacto emocional e econômico das viagens nas cidades [IBM, 2010].

ou o gigantesco engarrafamento ocorrido também em 2010, com mais de cem quilômetros na auto-estrada que liga Pequim ao Tibete, na China<sup>3</sup>.

De acordo com a revisão bibliográfica realizada neste trabalho, a falta de simuladores de tráfego desenvolvidos no Brasil impede que alguns comportamentos específicos oriundos da nossa cultura no trânsito possam ser devidamente simulados. Um esforço neste sentido é o projeto desenvolvido pelo Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, o SISCOT (*Integrated System of Simulation, Control and Optimization of Traffic*), com financiamento do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), que visa produzir uma ferramenta para simular o tráfego urbano e em autoestrada, baseado em um modelo microscópico utilizando software livre [PORTUGAL, 2005].

Como exemplo da importância em disponibilizar ferramentas para realizar a simulação de tráfego de veículos no país, cabe ressaltar um evento de grande porte que o Brasil sediará no próximo ano: os jogos olímpicos de 2016 na cidade do Rio de Janeiro. Com a adoção de uma ferramenta de simulação há a possibilidade de criar inúmeras situações hipotéticas nos principais locais de concentração de tráfego, com condições de possibilitar o estudo de alternativas para minimizar congestionamentos, principalmente em situações de mudança abrupta na densidade de veículos.

Os simuladores testados e os revisados teoricamente, em sua maioria, utilizam uma metodologia chamada *car-following*, onde a diferença entre os métodos é, basicamente, por

<sup>3</sup><http://www.estadao.com.br/noticias/internacional,china-tem-novo-engarrafamento-gigante,604115,0.htm>

ajustes e calibrações, conforme o algoritmo desenvolvido. Nesta dissertação, a modelagem define que um agente desconhece a existência de outros no ambiente, e a interação ocorre apenas entre o agente e o ambiente por meio de marcadores, ao contrário do que ocorre no *car-following*, onde a interação ocorre entre os agentes. Na metodologia proposta, a movimentação dos agentes é baseada em uma competição por recurso que, no caso, é o espaço disponível discretizado pelos marcadores. Através desta abordagem, pressupõe-se obter resultados de simulação condizentes com situações que ocorrem no tráfego real. Um detalhamento melhor será tratado no Capítulo 4.

No estudo realizado, verificou-se que várias mudanças na infraestrutura de uma rede de tráfego podem ser melhor definidas adotando-se uma ferramenta que permita simular previamente situações hipotéticas, que ocorrem com o passar do tempo ou situações inusitadas.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Construir um modelo de animação comportamental bio-inspirado capaz de simular o movimento de veículos em ambientes virtuais, tanto em vias urbanas quanto em autoestradas, através da ideia de colonizar o espaço de simulação por meio de marcadores disponibilizados no ambiente. De acordo com o princípio do raciocínio de terrenos (*terrain reasoning*), os marcadores são interpretados como espaços disponíveis para o deslocamento dos veículos em um ambiente bidimensional, além de disponibilizarem informações referentes ao fluxo de veículos na via. A proposta é baseada no modelo *BioCrowds* [BICHO, 2009], modelo comportamental proposto para a simulação de multidões.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os seguintes objetivos específicos são definidos:

- criar um modelo de simulação de tráfego para veículos com geometria bidimensional denominado *BioTraffic*, a partir do modelo *BioCrowds*, proposto para a simulação de pedestres, de modo que seja possível reproduzir padrões comportamentais de movimento dos veículos;

- 
- estabelecer respostas reais a parâmetros característicos dos veículos, como orientação, velocidade e aceleração;
  - adequar as características dimensionais dos veículos às configurações físicas do espaço simulado;
  - validar o modelo desenvolvido com dados extraídos de simuladores de tráfego comerciais.

## 2 Trabalhos relacionados

Este capítulo apresenta, através de uma taxonomia, os principais trabalhos para modelagem computacional do tráfego veicular propostos pela comunidade científica da área. A análise dos trabalhos foi realizada sob a óptica das abordagens conhecidas, a saber, a microscópica, a macroscópica e a mesoscópica.

### 2.1 Modelos Microscópicos

As contribuições que adotam a abordagem microscópica são aquelas que partem da modelagem individual do agente. As principais características desta abordagem, além de considerar informações de velocidade nas faixas e de hábitos de condução dos motoristas, é a possibilidade de simular, por exemplo, níveis de tolerância a congestionamentos, ofensividade ou defensividade dos condutores, além de questões mais abrangentes, tais como a modelagem de categorias veiculares menos usuais.

Na definição das características dos veículos, são consideradas variáveis como, por exemplo, aceleração, capacidade de frenagem e distância segura entre os veículos, definida através de suas dimensões e velocidades. De acordo com os trabalhos investigados, os principais métodos microscópicos de simulação identificados foram: *Cellular Automaton* (Autômato Celular), *car-following* (método carro seguidor e carro seguido), movimentação de partículas, *single lane* (métodos de faixa simples), *lane change* (mudança de faixa), dinâmica dos gases e *multi-agent systems* (sistemas multiagentes). A maioria destes métodos foi explanada no trabalho de CHOWDHURY et al. [2000].

Através de modelos microscópicos é possível alcançar um maior nível de especificidade na simulação do tráfego em relação aos modelos macroscópicos, pois o comportamento de cada veículo (agente) é tratado individualmente, possibilitando reproduzir o comportamento de um motorista ao volante. Comportamentos deliberativos e/ou reativos para um agente, de acordo com o ambiente dinâmico de simulação, também são considerados neste tipo de metodologia, uma vez que a interação do agente com o meio e com outros agentes deve ser considerada.

O modelo proposto por NAGEL and SCHRECKENBERG [1992] é um dos mais citados na literatura referente à simulação de tráfego. O trabalho apresenta um modelo estocástico para simular o tráfego em uma autoestrada através do uso de autômatos celulares. Neste modelo, foi utilizado um vetor de lugares denominado “ $L$ ”, onde cada lugar pode ser ocupado por apenas um veículo, representado por um número inteiro positivo referente a sua velocidade. A velocidade varia de *zero* até  $v_{MAX}$  (velocidade máxima do veículo definida no modelo). Com essa abordagem, foi possível verificar o efeito que ocorre no tráfego real de veículos: o efeito para-e-anda.

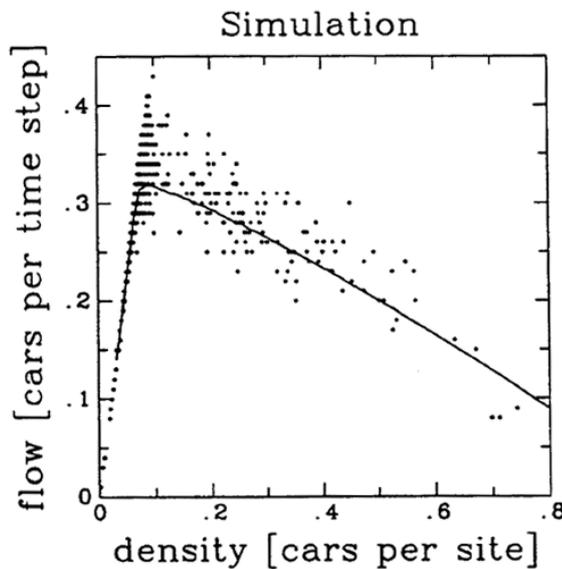


Figura 2.1: Simulação utilizando autômatos celulares [NAGEL and SCHRECKENBERG, 1992].

A cada iteração na simulação, o agente realiza quatro passos:

1. aceleração: se a velocidade  $v$  de um veículo é menor que a velocidade  $v_{MAX}$ , e se a distância para o carro a frente é maior que  $v + 1$ , a velocidade é acrescentada de uma unidade  $v \rightarrow v + 1$ ;
2. desaceleração (devido a outros carros): se o veículo na célula  $i$  percebe o veículo a frente na célula  $i + j$  (com  $j \leq v$ ), ele reduz sua velocidade para  $j - 1$  ( $v \rightarrow j - 1$ );
3. randomização: com probabilidade  $p$ , a velocidade de cada veículo (se maior que *zero*) é decrementada por uma unidade  $v \rightarrow v - 1$ ;
4. movimento do carro: cada veículo avança um determinado número de células, indicado por  $v$ .

Verifica-se, pelos passos definidos para cada agente, que este modelo é um exemplo do método *car-following*, visto que o agente tem uma relação direta com o agente a sua frente. Portanto, os personagens deste modelo são definidos por carro-seguidor e carro-seguido. Apesar de representar o fluxo de veículos de uma maneira simples, o trabalho de NAGEL and SCHRECKENBERG [1992] é considerado precursor na área de simulação de tráfego. Extensões desse modelo foram implementadas, utilizando a ideia principal de autômatos celulares e *car-following*, variando/acrescentando alguns parâmetros, de modo a reproduzir outros comportamentos conhecidos [ANDRIOTTI, 2004, LIMA, 2007].

O método *car-following* é um dos mais utilizados para a representação computacional do tráfego de veículos, devido a sua facilidade de uso e flexibilidade na readequação dos seus parâmetros. O trabalho de BRACKSTONE and MCDONALD [1999] apresenta uma revisão focada em vários modelos *car-following*. Outros autores, como PANWAI and DIA [2005], MA and ANDRÉASSON [2007] e BARRIA and THAJCHAYAPONG [2011] também apresentam pesquisas na área utilizando esse tipo de método.

RICKERT [1996] apresenta uma modelagem do tráfego para vias com duas faixas, inspirada no modelo com apenas uma faixa proposto por NAGEL and SCHRECKENBERG [1992]. O modelo de Nagel e Schreckenberg apresenta limitações quanto ao realismo das simulações, diferentemente da simulação do tráfego realizada com duas ou mais faixas, que permite simular comportamentos como a ultrapassagem (*overtaking*). Portanto, o modelo proposto consiste em duas faixas paralelas, e a adição de quatro regras que definem, por exemplo, a troca de veículos entre as faixas. As duas etapas mais importantes do modelo são a simetria e a estocasticidade. No que diz respeito à simetria, o conjunto de regras que define a mudança de faixa dos veículos pode ser tanto simétrico quanto assimétrico. A simetria é interessante para considerações teóricas, enquanto a assimetria considera o realismo. Tratando-se da estocasticidade do modelo, verificou-se que a antiga proposta de faixa simples era estritamente determinista e pouco realista, não apresentando, por exemplo, a formação espontânea de congestionamentos. O modelo apresentado é uma extensão da abordagem de autômatos celulares considerando o fluxo de tráfego em duas faixas. Basicamente, o esquema consiste em duas fases: cada veículo deve analisar o que está a sua frente, em sua própria faixa, e analisar a outra faixa, para verificar se há espaço suficiente para a realização de uma ultrapassagem.

O simulador de tráfego de veículos MITSIM (*Microscopic Traffic Simulator*), apresentado por YANG and KOUTSOPOULOS [1996], modela o tráfego na malha viária adotando controles como guias de rota e de sistema de vigilância. O projeto simula o movimento in-

dividual de cada veículo usando os métodos *car-following*, *lane change* e lógica de sinais de trânsito. O trabalho também verifica que há duas décadas já existia um alto número de ferramentas em fase de desenvolvimento, porém quase que a totalidade criadas para testes e validações de malhas viárias em pequena escala. De maneira a possibilitar a simulação de grandes malhas, o MITSIM é parte de um sistema composto por quatro módulos: gerenciamento de tráfego, sistema de vigilância, dispositivo de controle com roteamento e o próprio MITSIM. A principal função do módulo MITSIM é simular o estado da malha viária funcionando, ou seja, os motoristas da malha respondem aos controles de tráfego, enquanto interagem uns com os outros por meio do sistema de vigilância, que armazena a movimentação veicular através de sensores de tráfego. Para este trabalho, foi utilizado um modelo probabilístico de rota, selecionado para capturar o comportamento dos motoristas em um percurso. O modelo apresentado por YANG and KOUTSOPOULOS [1996] apresenta uma interface gráfica para o usuário e para a comunicação com outros módulos, como o controle de tráfego e de sistema de vigilância.

Em ALGERS [1997] são revisados e analisados modelos de micro-simulações, procurando identificar possíveis lacunas de pesquisa onde estes possam ser empregados. Esta parte do trabalho é componente de um grande projeto conhecido como SMARTTEST (*Simulation Modelling Applied to Road Transport European Scheme Tests*). O SMARTTEST é dividido em três etapas: a primeira aborda uma revisão feita por Algers e seus colaboradores, e as outras duas etapas são a investigação da forma com que os modelos mais completos podem preencher as lacunas investigadas e, por fim, incorporar os resultados encontrados em um manual de boas práticas para o uso de micro-simulações em modelos de transporte rodoviário, disseminando os resultados encontrados. O trabalho avaliou 32 modelos existentes para micro-simulação de tráfego. Uma das conclusões é que a maioria dos simuladores são ferramentas onde o tráfego é simplesmente um ambiente em que os carros trafegam de um ponto a outro através de faixas, formando filas no decorrer do tempo. Outros fatores pertencentes ao trânsito não são considerados como, por exemplo, a inclusão de outras categorias veiculares, como bicicletas e motocicletas, além de pedestres, veículos para o transporte público e até mesmo condições meteorológicas no período analisado. Foi possível identificar as principais lacunas dos modelos de micro-simulações e suas tecnologias, realizando uma análise dentre as ferramentas estudadas sobre as dificuldades de desenvolvimento e *design*. Os resultados apontam que os modelos de micro-simulação devem evoluir para modelos combinados, ou seja, modelos mesoscópicos. Outro fato evidenciado é que poderiam ser inseridos modelos de pedestres, de bicicletas e de motos, o que não ocorre em grande parte das tecnologias analisadas.

ESSER and SCHRECKENBERG [1997] propuseram um modelo microscópico baseado em autômatos celulares cuja aplicação envolve planejamento de tráfego e simulações cuja base de dados de trânsito se refere a informações em tempo real. A ferramenta de simulação é dividida nas seguintes partes: representações de redes (malhas) viárias, regulação de prioridade, orientação de veículo, classes de veículos, fontes, instrumentos de medição e controle de simulação. O módulo que trata as “classes” de veículos organiza as classes de acordo com os seguintes itens: velocidade, largura dos veículos e probabilidade de mudança de faixa. Os veículos, neste modelo, têm uma das principais funções: a medida da velocidade máxima, calculada com o acréscimo de um tempo de velocidade a cada passo de simulação. A largura dos veículos é calculada de acordo com o número de células que os mesmos ocupam. Esta característica é importante para o modelo, pois tendo essa flexibilidade para alterar o número de células para cada tipo de veículo, é possível controlar a diferença entre um ônibus e um carro de passeio. Na tentativa de deixar o modelo o mais próximo da realidade, o trabalho apresenta uma simulação de cruzamentos complexos, semáforos, regras de prioridade, capacidade de estacionamento e circulação de veículos de transporte público.

O uso de autômatos celulares para modelar o fluxo de tráfego limita alcançar algumas propriedades que emergem durante a movimentação dos veículos no tráfego real, distanciando o modelo computacional da realidade. Para apresentar um método que contribua para sanar algumas dessas limitações, KRAUSS et al. [1997] propuseram um modelo microscópico com estados metaestáveis. A intenção é permitir a modelagem, por exemplo, do tráfego em autoestradas, onde não interessa a propriedade de cada veículo ou agente do cenário, mas sim as médias, o cálculo de probabilidades, a densidade do fluxo de veículos e a distribuição populacional entre as faixas. Quando é utilizado para reproduzir o fluxo de tráfego de veículos em uma estrada, na realidade está se utilizando um método microscópico para a reprodução de um comportamento macroscópico, como ocorre no método de NAGEL and SCHRECKENBERG [1992]. No entanto, como este método trata de faixa simples, não fica claro o número de comportamentos macroscópicos que ele consegue reproduzir, se comparado com os encontrados no tráfego real. Para provar as limitações indicadas nos modelos que utilizam CA, o autor realizou alterações relativas, por exemplo, a saída de congestionamentos, introduzindo um ruído no passo de randomização do modelo original. Foi observada a redução do fluxo máximo de veículos, fazendo com que o modelo fique longe da realidade proposta sendo, portanto, insensível a mudanças nos seus parâmetros.

Medições do tráfego real levaram BARLOVIC [1998] a perceber a presença de es-

tados metaestáveis em fluxos intensos de tráfego. Estes fenômenos não haviam sido percebidos na pesquisa de NAGEL and SCHRECKENBERG [1992], que utilizou autômatos celulares para demonstrar o fluxo de tráfego. Para estabelecer estados metaestáveis, conforme a proposta desenvolvida nesse modelo, são utilizadas duas estratégias: na primeira, a densidade de veículos é alterada drasticamente, seja adicionando ou retirando veículos de seu estado atual; a segunda não requer nenhuma mudança na densidade. Este trabalho mostrou a flexibilidade de se trabalhar com autômatos celulares, tendo como base o modelo de Nagel e Schreckenberg para demonstrar algumas mudanças simples nas regras de comportamento. As interações entre os carros, neste modelo, são importantes para iniciar a formação dos congestionamentos, para verificar as variações na densidade e, também, identificar o momento em que ocorre a estabilidade do fluxo de veículos. O autor classifica os modelos em três classes, dependendo do valor máximo de aceleração e desaceleração. Um contraexemplo é o modelo de NAGEL and SCHRECKENBERG [1992], onde a desaceleração é limitada. A metodologia proposta apresenta um modelo realista, onde as simulações realizadas produziram formações emergentes de congestionamentos.

O trabalho proposto por BAZZAN et al. [1999] objetiva estudar um ponto importante para o realismo na modelagem de tráfego, que é o comportamento dos motoristas. O sistema de simulação não depende apenas do cenário que envolve os agentes e uma lógica de interação. É necessário considerar que, na condução de veículos, há pessoas com diferentes personalidades que possivelmente apresentarão comportamentos distintos para um mesmo cenário de simulação. O trabalho não estuda o caso clássico de simulação de escolha de rota, mas sim os aspectos sociais que envolvem o problema. O processo de tomada de decisão do ser humano não envolve apenas fatores lógicos, mas também fatores emocionais como: intenções, crenças, motivações, restrições culturais e sociais, ações impulsivas e a simples vontade de tentar [BAZZAN et al., 1999]. Para representar um exemplo sobre o modelo, é utilizado um caso simples, onde há dois caminhos possíveis para os viajantes: “R” e “A”, que ligam dois lugares de interesse comum a todos. Porém, a rota “R” é mais curta que a rota “A”, em contrapartida é informado que há um tráfego lento para a rota mais curta (rota “R”). Se todos os viajantes seguirem a informação e escolherem a rota “A”, certamente o caminho “R” será mais rápido. O trabalho é dividido em duas partes: na primeira, é estendido a modelagem de um motorista como um agente social com base em técnicas de sistemas multiagentes; na segunda, é gerado um retorno para a ferramenta de simulação a partir do modelo principal. Em um nível de planejamento, é utilizado um simulador de tráfego microscópico baseado no modelo de NA-

GEL and SCHRECKENBERG [1992]. Para lidar com a parte estratégica, foi desenvolvido um modelo deliberativo, capaz de lidar com tomadas de decisão racionais. Preferências, emoções e intenções são alguns dos fatores que desempenham papel nos movimentos dos agentes; quando determinadas ações se tornam repetitivas, o conhecimento do agente vai sendo construído. Como proposta futura, é sugerido a integração das ferramentas tática e estratégica junto aos seus ambientes.

O trabalho desenvolvido por TREIBER and HELBING [2002] demonstra a micro-simulação do tráfego usando algumas medidas de controle. A simulação faz uso dos métodos de *single lane* (faixa simples) para uma estrada principal e *lane change* (mudança de faixa) para entrada de rampas com o uso do modelo IDM (*Intelligent-Driver Model*) adequado para simular controles de tráfego. O método é relativamente simples, intuitivo e fácil de manipular, contendo apenas alguns poucos parâmetros de entrada, permitindo reproduzir algumas das propriedades mais relevantes do tráfego real. Neste método, são utilizadas apenas duas classes de veículos, carros e caminhões, sendo possível adicionar outras classes, uma vez que os veículos são representados por figuras geométricas simples, tais como retângulos. As principais medidas de controle tratadas no modelo são referentes aos limites de velocidade e de entrada em rampa. Com intuito de verificar a viabilidade de implantação do IDM para sistemas de assistência ao condutor, o trabalho possui uma seção dedicada à exposição da colaboração com a Volkswagen<sup>1</sup> no projeto. O sistema é configurado com controle de aceleração adaptativa, onde um detector identifica a distância entre o veículo corrente e o que está a sua frente, para que seja possível calcular a aceleração necessária. O autor conclui avaliando que as medidas de controle para tráfego homogêneo são adequadas para o controle de congestionamento e da diminuição dos tempos de viagem. Outros autores que utilizam o método de *lane change* em seus trabalhos são YANG and KOUTSOPOULOS [1996], HIDAS [2002] e HIDAS [2005]. O trabalho de TREIBER et al. [2000] utiliza simulações microscópicas com faixa simples para realizar observações empíricas no estado de tráfegos congestionados.

SEWALL et al. [2011] propõem um novo conceito para a construção e visualização de simulação de tráfego. Essa proposta consiste em demonstrar o fluxo de tráfego a partir das posições de cada veículo em dois locais da rodovia, virtualizada com o movimento de vários veículos ao longo da via. Para simular as trajetórias dos veículos, foram utilizados dados reais de entrada que permitiram a validação dos resultados das simulações. Esta metodologia é aplicável a cenários complexos, incluindo trevos de acesso e engarrafamentos. O trabalho

---

<sup>1</sup><http://www.vw.com.br/pt.html>

descreve uma abordagem prioritária de deslocamento em que carros à frente tem uma prioridade maior do que os demais em uma ordem decrescente de prioridade. A segunda fase, referente à validação dos resultados, é realizada com informações reais de entrada para as simulações obtidas através da Administração Federal de Estradas dos Estados Unidos. Os experimentos de validação com dados do mundo real, segundo o autor, foram promissores. Porém, há a necessidade de aperfeiçoamentos para a estrutura dos roteiros para que a técnica possa ser capaz de descrever melhor todas as características presentes no tráfego real de veículos. Por exemplo, ser capaz de descrever adequadamente o movimento de motocicletas que trafegam entre faixas, de permitir cruzamentos com semáforos ou placas de parada, ou de roteiros inteiros de ruas em áreas urbanas e não apenas um trecho da via.

Utilizando sistemas multiagentes, BUI et al. [2012] apresentam uma simulação de tráfego para vias do Vietnã. O trabalho tem a proposta de ajudar os planejadores de transporte a encontrar soluções para o problema do congestionamento do sistema de tráfego, bem como testar novas propostas antes de comprometer recursos para construir a infraestrutura de transporte. O sistema ainda permite criar diferentes cenários de simulação com vários perfis de agente, assim como simular a dinâmica de tráfego no Vietnã em diferentes situações. De acordo com o autor, um sistema de simulação de tráfego pode produzir dois tipos de resultados: estatísticos no que se refere a descrições quantitativas do que poderá acontecer e gráficos para que o usuário possa entender de que forma o sistema está se comportando. O trabalho tem como proposta futura realizar uma intensa coleta de dados para validar o modelo em relação a simulação e ao tráfego real.

Um estudo de revisão sobre a dinâmica de tráfego é apresentado por HELBING [2001], com os principais modelos utilizados e seus métodos, por exemplo: microscópicos (baseado em partículas), mesoscópicos (cinética dos gases) e macroscópicos (dinâmica dos fluidos). De acordo com o autor, estudos e trabalhos sobre os comportamentos característicos no tráfego são antigos se considerarmos a existência de veículos. Na década de 50 já havia um número considerável de atividades documentadas em periódicos sobre pesquisas operacionais e de engenharia. Verificou-se que, em geral, os modelos microscópicos que simulam o tráfego pressupõem que a aceleração de um agente " $i$ " é influenciada por sua vizinhança, onde o comportamento de condução é dado por " $i - 1$ " agentes à frente. Muitos dos sistemas foram caracterizados por mecanismos não-lineares, sendo algumas questões não são respondidas. Por exemplo, como pequenas perturbações podem ter efeitos tão significativos no trânsito? Os engarrafamentos emergem de onde? Neste trabalho, o autor já identifica aspectos de semelhança

comportamental entre pedestres e veículos como auto-organização e padrões coletivos de movimentos. Outro trabalho que trata da utilização de partículas para representar o tráfego de veículos, em específico a formação de congestionamentos, é tratado por SUGIYAMA [2008].

## 2.2 Modelos Macroscópicos

Os modelos macroscópicos desprezam o comportamento individual do veículo, propondo uma visão macro do ambiente e seu comportamento geral, como os seguintes exemplos: aplicações para modelos de densidade, controles de fluxo e velocidade. As restrições de movimento encontradas nesse tipo de análise são físicas como: construções, ruas, avenidas, autoestrada e interrupções na faixa.

Os pesquisadores Lighthill and Whitham [1955] propuseram um modelo de simulação de tráfego adotando um método de ondas cinemáticas o qual já era utilizado em modelos de projeteis supersônicos e movimento de inundações de rios. A teoria fundamental desse estudo é de que em qualquer ponto da rodovia, o fluxo de veículos por hora ( $q$ ) é uma função de concentração ( $k$ ) de veículos por quilômetro, onde leves mudanças no fluxo são propagadas de volta através do fluxo de veículos ao longo de ondas cinemáticas. Algumas propriedades são adicionadas ao modelo para deixar os movimentos dos veículos mais realistas, como uso do efeito de inércia, para não apresentar mudanças de velocidades instantâneas. As ondas de choque são observadas, por exemplo, em semáforos de trânsito onde os motoristas dos veículos são obrigados a levar a velocidade a zero quilômetros por hora quando as luzes vermelhas dos equipamentos são acionadas. O trabalho apresenta o uso das curvas de fluxo de concentração de veículos da seguinte forma: em um primeiro momento os dados são repassados fornecendo as principais informações, ao passo que, ao diminuir a velocidade a concentração do número de veículos aumenta; o segundo passo refere-se a ondas descontínuas que ocorrem em qualquer trecho da estrada quando o tráfego em relação ao motorista apresenta-se mais denso à sua frente e menos denso posteriormente a ele.

Kotsialos [2002] apresenta uma modelagem para o fluxo de tráfego em grande escala. O trabalho é focado em redes de autoestradas usando a ferramenta METANET para validação. Cabe salientar que este tipo de abordagem estava sendo usada pela primeira vez em redes de grande porte. Para a validação dos modelos o processo é dividido em duas fases: a validação quantitativa, serve para um número selecionado de trechos de autoestradas da rede, e

a validação qualitativa, que serve para permitir que o modelo de autoestrada capture a dinâmica em toda a rede congestionada. Os resultados obtidos com a ferramenta apresentaram resultados semelhantes nos ambientes virtuais em comparação com o tráfego real.

Com um algoritmo estocástico de movimento e planejamento, LIM [2009] validou o seu trabalho com um conjunto de táxis equipados com sistema de posicionamento global (GPS) e uma rede sem fio. Este modelo pode ser usado para um sistema prático de tráfego de informações. A rede rodoviária é um gráfico chamado de mapa geográfico, onde os “nós” representam interseções, arestas representam segmentos de estrada e o mapa geográfico é usado para combinar traços de GPS para segmentos de estrada reais, enquanto o "Mapa Estatísticas Delay" é usado para o roteamento do atraso estatístico [LIM, 2009]. Este trabalho pode ser aplicado em robôs, motoristas humanos (tráfego real) ou outros agentes que necessitam de um sistema de planejamento de congestionamento.

WORK [2010] apresenta uma nova equação diferencial escalar hiperbólica para evolução da velocidade de tráfego nas rodovias baseado no sistema Lighthill-Whitham-Richards (LWR), onde foi constatado que as soluções de equivalência não se sustentavam para as funções de fluxo geral. Para validação da proposta, o autor utilizou um projeto chamado de “Century Mobile”, um protótipo de sistema de coleta de dados foi testado durante um dia para estimar as condições de tráfego de uma rodovia próxima a São Francisco, na Califórnia. Participaram do projeto cerca de 165 estudantes da universidade de Berkeley e foram utilizados na pesquisa 100 veículos de transporte equipados com celulares Nokia N95 que trafegaram de seis a dez milhas continuamente durante oito horas. A parte da via escolhida foi a que apresentava fluxos mais complexos, possuindo propriedades como: períodos alternados de fluxo livre, tráfego mais lento quando o fluxo era mais pesado e tráfego sem congestionamento. A coleta dos dados foi feita a partir de dispositivos móveis usando VTLs (*Virtual Trip Lines*), que se trata de uma estratégia de amostragem como segmentos de linhas virtuais geográficas e funciona da seguinte forma: quando um veículo passa por um VTL, o telefone envia os dados para o sistema automaticamente. Para contornar os resultados onde os esquemas de equações não se sustentavam para as funções de fluxo geral, o autor propôs um modelo diferente baseado no esquema de transformações de Gudnov, onde constatou uma concordância maior com as estimativas de velocidade.

WILKIE [2011] apresenta um novo algoritmo para planejamento de rotas que usa caminhos previamente traçados seguindo um roteiro estocástico. Com a obtenção dos dados históricos e as densidades previstas pelos carros à frente, o algoritmo faz uma combinação

cruzando as informações e posteriormente calcula a melhor rota. O algoritmo foi aplicado em grande escala e apresentou bons resultados em relação a previsão do tráfego futuro, o que resultou em uma redução do tempo de viagem para os veículos que utilizaram o mesmo. O tempo de viagem estimado foi calculado usando um diagrama fundamental com os dados sobre a densidade de veículos, que é atualizada para todos os carros que estão na rede. O diagrama fundamental é dado pela densidade do fluxo e o tempo de viagem através de uma consulta para cada veículo entre o seu ponto de partida e seu objetivo. Este trabalho preenche uma lacuna na questão do planejamento estocástico de rotas para tráfego de veículos, onde é possível prever o melhor deslocamento para os veículos.

## 2.3 Modelos Mesoscópicos

Modelos de simulação que podem ser definidos como intermediários ou híbridos, pois não tem como definição única a microscopia ou a macroscopia. As abordagens nesses tipos de análise tratam da junção de alguns métodos de ambas análises e são relativamente difíceis, devido à tamanha diferença entre os modelos microscópicos e macroscópicos. Além da dificuldade em trabalhar simultaneamente com os dois tipos de modelo, outro problema que os pesquisadores enfrentavam no passado era a falta de tecnologia para validação dos métodos desenvolvidos.

Utilizando-se da cinética dos gases, HELBING [2002] apresenta um novo método de *car-following* para a simulação de tráfego congestionado. O método possui uma calibração fácil e intuitiva. Simulações do tipo microscópica e macroscópica com esse modelo produzem o mesmo estado de tráfego visto em métodos empíricos utilizando uma única faixa. Neste trabalho foi possível adotar a ideia de mais de um tipo de veículo, aumentando a proximidade da simulação com a realidade, o que não ocorria em métodos anteriores. Com uma visão física sobre os fenômenos, o autor identifica os modelos microscópicos de simulação de tráfego como delineadores de posição e velocidade, onde os veículos interagem uns com os outros e os modelos macroscópicos como medidores de densidade e médias de velocidade. Neste método, ao simular a dinâmica de tráfego em várias faixas, é possível considerar a probabilidade da capacidade de ultrapassagem entre os veículos. Foi estabelecida uma ligação entre modelos macroscópicos e microscópicos para realizar simulações simultâneas. Uma das vantagens de modelos macroscópicos de tráfego é que eles nos permitem simular a dinâmica de tráfego em várias faixas por modelos eficientes de faixa simples [HELBING, 2002]. Cabe salientar que,

ao modelar veículos em um ambiente macroscópicos adotando faixas simples, perde-se a possibilidade de observar o comportamento de *overtaking* (ultrapassagens). Neste trabalho uma das maiores dificuldades é a parte de comparação de modelos macroscópicos e microscópicos em relação a separação ou diferença entre escalas.

O trabalho de FLORIAN et al. [2008] descreve uma simulação baseada na dinâmica de equilíbrio iterativo para alocação de tráfego e otimização das rotas de todos os fluxos em uma rede de médio porte. A resolução do problema utiliza o método das médias sucessivas (MSA), combinado com um método baseado em eventos de trânsito para tratar o comportamento dos veículos. Os carros neste método são roteados e simulados, onde há uma função na simulação que fornece o estado atual da rede e servirá para a próxima iteração no roteamento. O método apresenta um excelente potencial para uma variedade de aplicações relacionadas com testes de medidas envolvendo Sistemas de Transporte Inteligente (ITS) *off-line* e também pode ser utilizado para o desenvolvimento de uma ferramenta *on-line* devido ao baixo tempo de computação e requisitos de memória. Sua eficiência computacional foi definida como uma ordem de grandeza mais rápida que os modelos microscópicos com o mesmo tipo de proposta.

Potuzak faz uma comparação baseada em modelos microscópicos e macroscópicos de redes de estrada onde os métodos são focados no carregamento uniforme dos resultados de sub-redes [POTUZAK, 2011]. Os Modelos são nomeados de MiSBD para o microscópico e MaSBD para o macroscópico que usa um tipo de simulação determinista. O modelo MaSBD é utilizado para verificação do carregamento uniforme do processo de simulação que ao mesmo tempo está simulando o resultado do tráfego das sub-redes. A simulação macroscópica é usada para atribuir pesos particulares para cada faixa de tráfego na simulação. A parte do modelo MiSBD em comparação com o modelo MaSBD trata com o mesmo princípio, porém com o cálculo dos pesos das vias de tráfego usando a simulação microscópica. Os resultados indicam que, em relação ao balanceamento de carga, o modelo macroscópico mostra um desempenho parecido com o modelo microscópico e, se tratando da utilização de um modelo macroscópico, o determinista é mais rápido que o método MiSBD. O trabalho demonstra ser útil no que se refere a divisão de grandes redes de tráfego de veículos em sub-redes e tem uma proposta futura de explorar modificações no modelo MaSBD para ambientes de computação com diferentes poderes computacionais, pois os resultados dos testes mostraram uma eficácia maior nos métodos macroscópicos de balanceamento de carga, sendo este indicado para a divisão de uma grande rede em sub-redes.

SEWALL [2011] propõem uma técnica de simulação híbrida que combina os pontos

fortes de duas classes amplas e diferentes de simulação de tráfego para executar uma simulação flexível, interativa e de alta-fidelidade, mesmo para grandes redes de estradas. Quando utiliza o tipo de *agent-based* (microscópica) o método é aplicado para simulações em que há necessidade de uma melhor visualização da região de interesse em que o comportamento do condutor é o ponto mais importante e quando utiliza o *continuum-based* (macroscópico) o método é proposto para a simulação e controle de fluxo de visualização do tráfego. O método apresenta técnicas para integração dos dois modelos, microscópico e macroscópico, sem interferir na simulação do fluxo de tráfego de veículos das regiões opostas a que está em observação. O principal destaque da técnica apresentada é a junção dos dois tipos diferentes de simulação e como eles interagem sem interferir no comportamento um do outro. O autor salienta que para o caso de movimentação no ambiente de simulação o método *car-following* é aplicável para modelos que tratam com *agent-based*, porém, há necessidade de pensar em criar outras formas de movimentação dos agentes, sempre buscando deixar os modelos que serão empregados nas ferramentas mais fidedignos possíveis. O trabalho tem como algumas de suas intenções para propostas futuras adicionar uma técnica para o uso em aplicações que tratam o tráfego em tempo real e também examinar o comportamento individual dos veículos que trafegam por vias arteriais que podem afetar o comportamento dos veículos que trafegam por autoestradas. Este é um ponto em que muitas simulações e métodos deixam a desejar, visto que tratam apenas de um local específico, de um trecho de estrada ou de uma parte de uma rede, sem ter a precisão de onde estão surgindo os veículos (*input*) e por onde sairão estes veículos (*output*). Como colocado anteriormente pelo autor, fica explícito a preocupação de adotar outras formas de movimentar os agentes no espaço de simulação e não contar apenas com as variações do método *car-following*.

WILKIE et al. [2010] apresenta um trabalho que trata dados de GIS *geographic information system* em modelos funcionais de estradas para simulações de tráfego em larga escala. Existem várias ferramentas de GIS que exportam os dados com múltiplas linhas como atributos para a montagem de uma rede rodoviária, porém esses dados são insuficientes para reprodução de simulações e visualizações 3D. No trabalho é proposto um método para melhorar um deslocamento qualquer a partir de um sistema de banco de dados GIS. A partir desse deslocamento é realizada a criação de um modelo 3D consistente geometricamente, para que possa ser feita a simulação de tráfego em tempo real. A criação do método não se limita a construir apenas o deslocamento de um veículo, ela também fornece recursos importantes do cenário a ser criado, por exemplo: rampas de acesso, viadutos e intersecções entre estradas. O algoritmo utiliza técnicas, tanto microscópicas quanto macroscópicas para a geração das re-

des rodoviárias. O método desenvolvido apresenta três características fundamentais, que são: fornecer uma representação de rede rodoviária com detalhes necessários para a simulação de tráfego com visualização realista utilizando dados de GIS como entrada, definir que os modelos resultantes de estrada serão contínuos e ser computacionalmente eficiente para operações como cálculo de distância entre os carros e consultas baseadas em localização.

## 2.4 Considerações finais sobre os trabalhos relacionados

De acordo com as pesquisas investigadas durante a revisão bibliográfica, de uma forma geral, houve um alto crescimento e interesse sobre os modelos “mesoscópicos” nos últimos anos. Alguns dos fatores que contribuem diretamente para esse fato são: o aumento do poder de computação gráfica atual que os pesquisadores não possuíam em tempos anteriores, o poder computacional que cresceu ao longo dos anos viabilizando este modelo de pesquisa e a possibilidade de aproximar as principais vantagens particulares dos modelos microscópicos e macroscópicos.

A Figura 2.2 apresenta uma linha do tempo com as três classificações de modelos e três principais trabalhos com seus respectivos pesquisadores que foram examinados durante a revisão bibliográfica. Estes trabalhos destacam-se pelo número de citações comparado com os revisados durante a pesquisa.

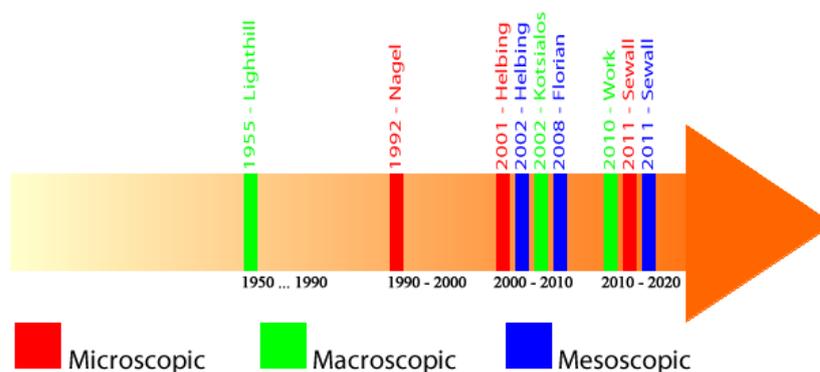


Figura 2.2: Linha do tempo - tipo de modelo, ano, pesquisador.

Existem inúmeros métodos e pesquisas que tratam com vários casos distintos em relação ao tráfego de veículos em ambientes virtuais, mas fica evidente que a busca principal é criar modelos cada vez mais robustos que se aproximem do tráfego real de veículos para poder incorporá-los em ferramentas dos mais diversos tipos de aplicação, por exemplo: ferramentas para a gestão de tráfego, ambientes imersivos de simulação e também para o entretenimento.

A Figura 2.3 apresenta os modelos de visualização da ferramenta de simulação de tráfego SUMO (*Simulation of Urban MObility*). Da esquerda para a direita: macroscópicos, microscópicos, sub-microscópicos (não abordado nesse trabalho) e mesoscópicos (figura no círculo superior).

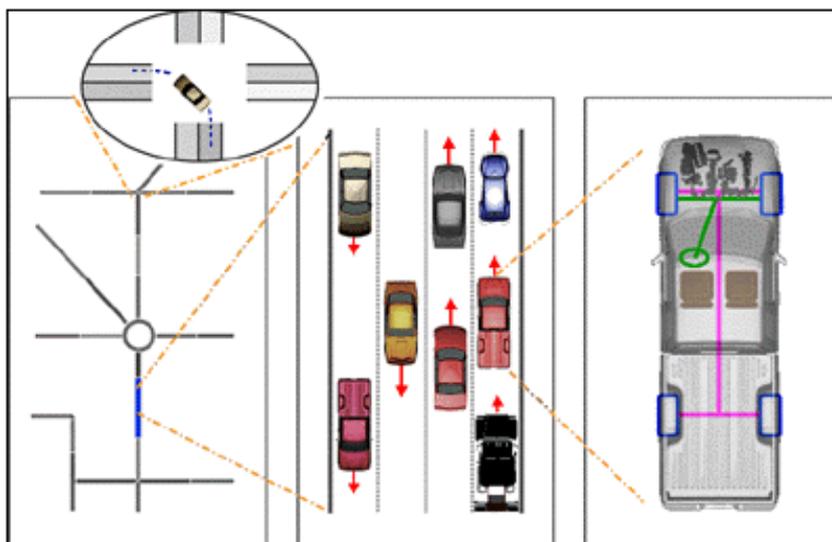


Figura 2.3: Classes de modelos para simulação do fluxo de tráfego [BEHRISCH, 2011].

As contribuições nesta linha de pesquisa iniciaram há algum tempo, mas de acordo com a revisão bibliográfica realizada, verificou-se que ainda não temos metodologias que permitam simular a totalidade do cenário de tráfego de veículos. Ainda há carência em alguns fatores, por exemplo: o uso da Inteligência Artificial para incorporar o comportamento humano nos motoristas das simulações, a inclusão de outras categorias de agentes (ciclistas e motociclistas) e a possibilidade de criar perturbações no ambiente de simulação (nível de agressividade do condutor, acidentes, manutenção nas vias, inclusão de condutores desorientados e simulações de imersão em ambientes hostis para guiar um veículo). Em relação à carência, cabe ressaltar a importância da imersão no ambiente de simulação para educação e habilitação de condutores, onde haveria a possibilidade de guiar um veículo em diferentes locais com informações fiéis do trânsito da região simulada através de configuração previamente repassada ao simulador.

Alguns pesquisadores perceberam que não adianta apenas simular áreas e problemas locais sem saber de onde está surgindo o tráfego de veículos e para onde ele é destinado. A partir dessa percepção, os modelos passaram a ter um realismo maior nas metodologias para as ferramentas utilizadas. Com esse problema resolvido, passou-se a ter um entendimento mais apurado em relação a simulação de tráfego de veículos e também a ser adotado o conceito de grandes redes de simulação de tráfego.

## 3 Materiais e métodos

Neste capítulo são apresentadas as principais ferramentas utilizadas durante a pesquisa, tanto no processo de construção do modelo quanto na validação dos resultados obtidos.

### 3.1 Ferramentas para o desenvolvimento do modelo de simulação de tráfego

A escolha do software para desenvolvimento e validação do modelo foi realizada após a revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados, inclusive de revisões que tratavam apenas de comparações entre ferramentas para simulação como, por exemplo, em KOTUSEVSKI and HAWICK [2009].

KOTUSEVSKI and HAWICK [2009] realizou uma revisão entre seis importantes ferramentas de simulação que são: SUMO (*Simulation of Urban MObility*), *Quadstone Paramics Modeller*, *Treiber's Microsimulation of Road Traffic*, AIMSUN, SimTraffic e CORSIM TRAFVU. Neste estudo, cabe ressaltar as seguintes características que foram adotadas como critério de comparação: se a ferramenta mantinha o código aberto e possuía o uso livre, se eram portáteis quanto a sistemas operacionais, quais delas possuíam documentação, se havia a possibilidade de criação de redes de tráfego, como se portavam quanto à qualidade gráfica apresentada, como era realizada a saída de dados, se teriam capacidade de simular grandes redes de tráfego, quais os recursos adicionais cada uma oferecia e qual o custo computacional em relação ao uso de CPU e memória.

Nesse sentido, a ordem de prioridade dos critérios estabelecidos inicialmente para a escolha da ferramenta de desenvolvimento a ser utilizada na criação do modelo *BioTraffic* foi a seguinte:

1. possuir o código aberto para possibilitar a alteração do comportamento dos agentes, pois somente desta maneira será possível validar a metodologia proposta nesta pesquisa;
2. possuir uma boa qualidade gráfica e um custo computacional razoável;

3. ter, internamente, mais de uma classe de agentes para realizar simulações de ambientes realísticos, que reflitam o que acontece no tráfego de veículos no mundo real ou, ao menos, ter a possibilidade de criação de novas classes na ferramenta. Esse critério é um dos fundamentais para uma simulação fidedigna, uma vez que o tamanho (largura e comprimento) e a velocidade dos veículos têm influência direta nos resultados dos experimentos;
4. possibilitar a modelagem de mais de uma *lane* (faixa) para ser interpretado o comportamento de *overtaking* (ultrapassagem) nas simulações que envolvam diferentes tipos de veículos, ou veículos da mesma classe com velocidade diferente. Com esse atributo disposto na ferramenta, é possível criar simulações contendo desde vias urbanas até autoestradas.

De acordo com BRASIL [1997], as vias abertas à circulação, de acordo com sua utilização, classificam-se em: I - vias urbanas: a) via de trânsito rápido; b) via arterial; c) via coletora; d) via local; II - vias rurais: a) rodovias; b) estradas. Assumindo essas definições, outro fator importante para a escolha da ferramenta de simulação é que a mesma contenha o número máximo de componentes que fazem parte do tráfego de veículos, ou que ao menos permita as implementações necessárias.

A ferramenta de simulação inicialmente escolhida para o desenvolvimento da proposta foi o SUMO (*Simulation of Urban MObility*) - Simulação de Mobilidade Urbana. Trata-se de uma ferramenta de simulação de tráfego de veículos multi-modal que trabalha com a linguagem de programação C++, sendo também uma ferramenta *open-source* (código aberto).

Na Universidade da Carolina do Norte - USA, existe um grupo de pesquisadores conhecido como GAMMA (*Geometric Algorithms for Modeling, Motion, and Animation*), que possui a mesma linha de pesquisa do *BioTraffic*, ou seja, adotar a ideia de um modelo de simulação de pedestres para a simulação de veículos. Porém, cabe ressaltar que o grupo utiliza uma metodologia diferente para o deslocamento dos agentes no ambiente de simulação. Outra motivação para a escolha do SUMO foi a investigação feita sobre quais ferramentas este grupo de pesquisadores utilizava, principalmente na parte de validação e comparação de seus resultados.

A implementação do modelo no SUMO ficou comprometida, pois a única forma de resolver problemas que surgiam durante o desenvolvimento era uma lista de discussão que demorava em média duas semanas para o retorno das respostas que nem sempre colaboravam para a resolução. Esse fato motivou que fosse investigado outro *software* para a parte de implementação do trabalho. Portanto, foi necessário buscar outra ferramenta que correspondesse aos

requisitos anteriormente elencados para a implementação da proposta de pesquisa.

Inicia-se então uma segunda fase de investigação, onde a ferramenta escolhida ofereceu o suporte necessário com vasta documentação disponível. Optou-se pela ferramenta NetLogo, por se tratar de um ambiente de modelagem programável de fenômenos naturais e sociais amplamente usado na área de sistemas multiagentes. O programa foi escrito por Uri Wilensky, em 1999, e desde então está em desenvolvimento pelo *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling* [WILENSKY, 1999]. O ambiente permite a modelagem de sistemas complexos com milhares de agentes de forma independente, ou seja, é possível programar em um nível microscópico e analisar o nível macroscópico que emerge da interação entre os agentes e o ambiente de simulação. Por ser executado em uma máquina virtual, os modelos podem ser facilmente implementados e visualizados nas principais plataformas, o que torna ampla a sua portabilidade para outros sistemas operacionais. Possui uma quantidade significativa de modelos implementados sobre as seguintes áreas: artes, biologia, química e física, ciência da computação, ciências naturais, economia, ciências sociais e matemática,

Mesmo que o NetLogo não seja uma ferramenta exclusiva para o tráfego de veículos, o objetivo principal da proposta pôde ser implementado, que é a criação do modelo *BioTraffic*, ou seja, representar a parte comportamental dos veículos em um ambiente virtual através da disputa pelo espaço no ambiente de simulação.

O NetLogo possui agentes móveis chamados de “turtles” e estes podem ser divididos em raças (*breeds*) para dar características únicas a uma determinada quantidade de agentes. Os agentes estáticos do NetLogo são chamados de “*patches*” e organizados sobre um grid orientado pelo plano cartesiano. Este plano pode ser orientado para ser trabalhado em apenas um quadrante ou também da forma trivial, com o eixo “x” orientado no centro do cenário de simulação. Possui funções de exportação e importação, por exemplo: exportação de dados, importar um cenário e fazer um filme.

## 3.2 Ferramenta para a validação

Entre os *softwares* utilizados durante o período de análise de compatibilidade com a implementação do modelo proposto, o AIMSUN, desenvolvido pela *Transport Simulation Systems - TSS*, foi o que apresentou melhor usabilidade e praticidade para a construção dos cenários de simulação, controle sobre as demandas de veículos, adição de diferentes modais e validação

dos resultados [AIMSUN, 2013a]. Portanto, a proposta de pesquisa será implementada no NetLogo e, ao final, validada no AIMSUN com um cenário igual em ambos os *softwares*. Assim, será analisada a hipótese da proposta de pesquisa, ou seja, se há aproximação de resultados quando o deslocamento dos veículos é tratado pela disputa de marcadores dispostos no cenário de simulação.

O AIMSUN é um software de modelagem de tráfego rodoviário que permite criar desde uma única faixa até o controle de transporte público para toda uma região. O AIMSUN se destaca pela alta velocidade computacional das suas simulações, pela fusão de modelagem da demanda de viagens, pela alocação de tráfego estático e dinâmico com simulação macroscópica, microscópica e híbrida, tudo dentro uma única aplicação de software [AIMSUN, 2013a].

O modelo de *car following* utilizado no AIMSUN se refere ao modelo de GIPPS [1981]. O desenvolvimento do modelo não se baseia em parâmetros globais, mas sim por parâmetros de cada tipo de motorista (limite de velocidade, aceitação de veículo), pela geometria de cada seção (velocidade limite, velocidade limite nas curvas e outros) e pela influência dos veículos nas faixas adjacentes [AIMSUN, 2013a]. Com isso, o trabalho constrói um novo modelo para a resposta aos veículos seguidores, baseado no pressuposto que cada veículo define como desaceleração desejada e taxas de aceleração.

A Figura 3.1 apresenta a área de trabalho do AIMSUN. Na parte esquerda (*Base*) da figura é ilustrado um mapa atual com as configurações de infraestrutura viária do local. Na parte direita (*Future*) é apresentada a modificação do entrocamento rodoviário onde será adicionado uma rotatória. As cores da figura representam a densidade do tráfego na via, as mais escuras tem peso maior em relação as mais claras.

### 3.3 BioCrowds - um modelo inspirado na Biologia

O presente capítulo apresenta o modelo *BioCrowds*<sup>1</sup> e seus principais comportamentos. A análise do modelo de multidões permitirá entender e determinar o que deverá ser implementado para o modelo de veículos, o *BioTraffic*.

---

<sup>1</sup>O modelo de multidões é apresentado no Capítulo 3 da tese de BICHO [2009]

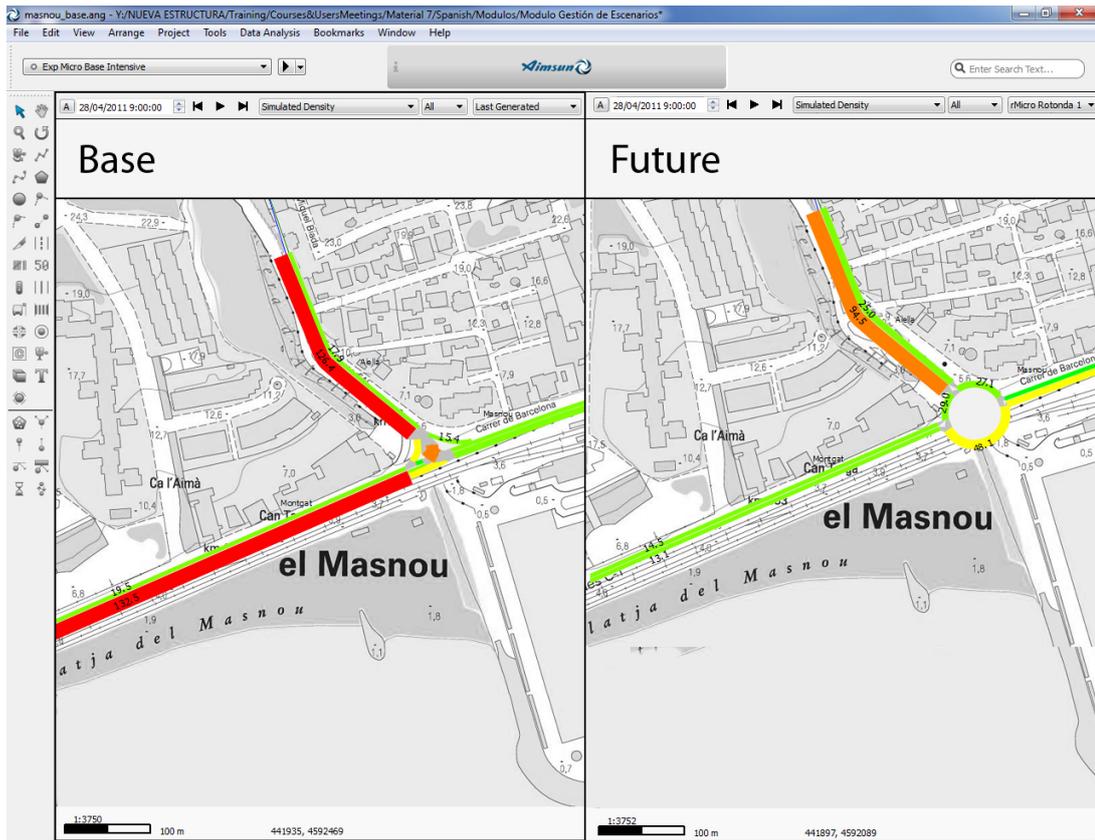


Figura 3.1: Área de trabalho do AIMSUN - El Masnou Espanha [AIMSUN, 2013a].

### 3.3.1 O modelo de simulação de multidões

Os princípios da animação comportamental são inspirados em um modelo precursor proposto por Reynolds [REYNOLDS, 1987]. O objetivo desse trabalho é simular os movimentos de bandos de pássaros, rebanhos de animais e cardumes de peixes, através da definição de personagens autônomos virtuais que determinam suas próprias ações no ambiente. As três principais regras para definir os comportamentos coletivos são: 1 - separação, onde o personagem deve manter uma distância mínima dos vizinhos e obstáculos no ambiente, 2 - Alinhamento, pois o ajuste na velocidade deve ser mantido para não colidir com outros personagens, 3 - coesão, para que seja mantida a posição próxima ao centroide dos personagens vizinhos.

O modelo foi originalmente proposto por RUNIONS et al. [2007] para modelar o desenvolvimento de nervuras de folhas vegetais e ramos de árvores por meio da disputa de um hormônio vegetal chamado “auxina”. O trabalho apresenta uma grande potencialidade de aplicação em diversas áreas de pesquisa com sua ideia principal que é a disputa por espaço livre. Inspirado no modelo biológico supracitado, BICHO [2009] propôs o modelo chamado *BioCrowds*, para simular a dinâmica das multidões onde cada agente, para chegar ao local

desejado, disputa por espaço utilizando marcadores como recurso disponibilizados no ambiente, evitando colidir com outros agentes e obstáculos colocados nos cenários. Seguindo a mesma linha de raciocínio, esta proposta de trabalho apresentará o modelo denominado *BioTraffic*, que trata da criação de um novo modelo para o deslocamento de veículos em um ambiente virtual baseado no modelo *BioCrowds*.

O algoritmo utilizado no modelo *BioCrowds* para disponibilizar os marcadores trata-se de uma versão adaptada do algoritmo de “lançamento do dardo” (“*dart-throwing*” *algorithm*) [COOK, 1986, MITCHELL] apud [BICHO, 2009], com essa metodologia os marcadores são disponibilizados no ambiente de forma uniforme e randômica. A cada lançamento, o algoritmo calcula se existem outros pontos com distância menor do que a pré definida e se esta condição for satisfeita, o ponto é descartado, caso contrário ele é adicionado no cenário de simulação e um novo processo é iniciado. A distância mínima estabelecida antes do início do processo influencia na quantidade de marcadores por  $m^2$ , e por consequência, na eficácia da simulação. Esta fase possui um custo computacional alto, pois todo o ambiente deve ser preenchido com marcadores, respeitando as regras de distribuição impostas pelo algoritmo, portanto, essa fase é realizada apenas uma vez antes da simulação e o cenário deve ser salvo para futuros experimentos, afinal, com isso garante-se que todos os cenários tenham a mesma configuração certificando a fidelidade do processo.

A complexidade do Algoritmo 1 é dependente da quantidade total de agentes  $n$  e do número total de marcadores  $m$ , sendo  $O(nm)$  [BICHO, 2009].

**Algoritmo 1:** Algoritmo para simulação de multidões - *BioCrowds*.**Entrada:**  $FPS, agentes, S, s_{\max} \geq 0, R \geq 0, r \geq 0$ **Saída:**  $agentes$ 

```

1:  $s'_{\max} = s_{\max}/FPS$ 
2: repita
3:   para cada agente  $i$  faça
4:      $S_i = \emptyset$ 
5:   fim para
6:   para  $a \in S$  faça
7:      $i = agenteMaisProximo(a)$ 
8:     se  $distancia(p_i, a) \leq R_i$  então
9:        $S_i = S_i \cup \{a\}$ 
10:    fim se
11:  fim para
12:  para cada agente  $i$  faça
13:    se  $S_i \neq \emptyset$  então
14:       $S'_i = \{d \mid a \in S_i, d = a - p_i\}$ 
15:       $m_i = \sum_{d \in S'_i} w d$ , onde  $w = f(g_i, d) / \sum_{d' \in S'_i} f(g_i, d')$ 
16:      se representação do agente for finita então
17:         $m'_i = calculaConvexHull(r_i, S_i, m_i)$ 
18:         $v_i = (m'_i / \|m'_i\|) s_{\min}$ , onde  $s_{\min} = \min \{\|m'_i\|, s'^i_{\max}\}$ 
19:      senão
20:         $v_i = (m_i / \|m_i\|) s_{\min}$ , onde  $s_{\min} = \min \{\|m_i\|, s'^i_{\max}\}$ 
21:      fim se
22:       $p_i = p_i + v_i$ 
23:    fim se
24:  fim para
25: até encerrar simulação

```

**3.3.2 Cálculo para a movimentação e orientação do agente**

Cada vez que o agente  $i$  se movimenta na simulação, é necessário realizar a atualização da sua posição  $p(t)$  e, conseqüentemente o vetor objetivo  $g(t)$  (ponto de destino do agente no cenário de simulação). O conjunto  $S$  contém todos os marcadores próximos ao agente  $i$  no cenário de simulação, estes marcadores fazem parte da chamada “área de percepção”, sendo  $S = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ .

O conjunto de  $N$  marcadores ligados ao agente  $i$  é  $S = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ . Portanto, para calcular o próximo passo do agente  $i$  e obter uma nova posição, utilizamos o seguinte conjunto de vetores:

$$S' = \{d_1, d_2, \dots, d_N\}, \text{ onde } d_k = a_k - p, \quad (3.1)$$

considerando a posição  $p$  do agente e os marcadores contidos em  $S$  (marcadores contidos na

área de percepção).

Segundo BICHO [2009], na geração de padrões de nervuras, os vetores em  $S'$  são normalizados e somados, resultando na orientação para o crescimento da nervura. Na simulação do deslocamento de um agente, também é necessário considerar o seu destino (o vetor objetivo  $\mathbf{g}$ ). Portanto, para cada vetor  $\mathbf{d} \in S'$  é atribuído um peso referente ao seu alinhamento com o vetor objetivo do agente, ou seja, ao ângulo entre os referidos vetores. Especificamente, o *vetor de movimento*  $\mathbf{m}$  é

$$\mathbf{m} = \sum_{k=1}^N w_k \mathbf{d}_k, \quad (3.2)$$

onde os coeficientes  $w_k$  são os pesos, calculados através da equação

$$w_k = \frac{f(\mathbf{g}, \mathbf{d}_k)}{\sum_{l=1}^N f(\mathbf{g}, \mathbf{d}_l)}. \quad (3.3)$$

Para determinar a função  $f$ , assume-se que todos os marcadores  $\mathbf{a}_k$  que influenciam o deslocamento do agente  $i$  estão a uma mesma distância  $\|\mathbf{d}_k\|$  deste agente. A função  $f$  deve:

1. atingir seu valor máximo quando o ângulo  $\theta$  entre o vetor objetivo  $\mathbf{g}$  e o vetor  $\mathbf{d}$  for igual a  $0^\circ$ ;
2. atingir seu valor mínimo quando  $\theta = 180^\circ$ ;
3. decrescer monotonicamente a medida que  $\theta$  cresce de  $0^\circ$  a  $180^\circ$ ;
4. apresentar valores maiores ou iguais a zero.

De acordo com BICHO [2009], se as distâncias  $\|\mathbf{d}_k\|$  são diferentes, os marcadores mais distantes do agente terão pesos relativamente menores, precavendo-se de um possível domínio destes marcadores no cálculo do vetor de movimento  $\mathbf{m}$ . Uma possível escolha para  $f$  que satisfaz as questões mencionadas é

$$f(\mathbf{g}, \mathbf{d}_k) = \begin{cases} \frac{1 + \cos \theta}{1 + \|\mathbf{d}_k\|} = \frac{1}{1 + \|\mathbf{d}_k\|} \left( 1 + \frac{\langle \mathbf{g}, \mathbf{d}_k \rangle}{\|\mathbf{g}\| \|\mathbf{d}_k\|} \right), & \text{se } \|\mathbf{d}_k\| > 0 \\ 0, & \text{se } \|\mathbf{d}_k\| = 0, \end{cases} \quad (3.4)$$

No caso  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  representa o produto interno. O termo  $\frac{1}{1 + \|\mathbf{d}_k\|}$  é dependente da distância dos marcadores ao alcance dos agentes, pois a mesma diminui conforme o aumento de distância. Os pesos definidos pela Equação 3.3 atendem  $w_1 + \dots + w_N = 1$ , excluindo o caso em que o denominador seja nulo. Neste caso, existem três hipóteses:

1. a inexistência de marcadores no conjunto  $S$ ;
2. a existência de apenas um marcador no conjunto que coincide com a posição  $p$ ;
3. quando o ângulo  $\theta$  entre o vetor  $d$  e o vetor objetivo  $g$  for  $180^\circ$ ,  $\forall d \in S'$ . Nestes casos, o valor da função  $f$  será 0,  $\forall a \in S$ .

Na Equação 3.2 foi apresentado o vetor  $m$  que é responsável pelo movimento do agente da sua origem até o seu destino. Durante o percurso, quando há espaço disponível, o modelo permite que o agente movimente-se com uma velocidade máxima desejada  $s_{\max}$ . Em relação a disponibilidade do espaço, quando o agente percorre por locais mais densos, com menor disponibilidade de marcadores, com número excessivo de agentes ou com obstáculos, a sua velocidade é reduzida. Para isso, o modelo necessita ajustar a velocidade de deslocamento do agente de acordo com o módulo do vetor  $m$  e o valor  $s'_{\max}$ . O vetor de movimento instantâneo, em unidades de deslocamento por mudança de posição (cada iteração),  $v$  é dado por

$$v = s_{\min} \frac{m}{\|m\|}, \text{ onde } s_{\min} = \min \{\|m\|, s'_{\max}\}. \quad (3.5)$$

Na Equação 3.5 nota-se que, caso  $\|m\| > s'_{\max}$ , o máximo deslocamento do agente é limitado por  $s'_{\max}$ . De outra forma, o deslocamento é dado por  $\|m\|$ .

### 3.3.3 Análise de colisão entre agentes

No modelos de simulação de multidões, cada agente tem o tamanho infinitesimal, ou seja, é representado por um ponto. O centroide de cada agente nunca colidirá com outros, porém, os seus círculos podem interseccionar com os demais, o que de fato não seria uma colisão no mundo real. O modelo possui uma modificação para assegurar que o agente  $i$  mantenha uma distância mínima dos demais, através das arestas do polígono que estão ligados a ele no momento do deslocamento.

Para que seja possível esta solução, utilizou-se o algoritmo que calcula o polígono convexo que circunscreve um conjunto de pontos denominado *Convex Hull* [BICHO, 2009]. Portanto, conhecido o polígono gerado pelo *Convex Hull*, para que cada agente tenha o seu movimento adequado aos limites definidos por suas arestas, o vetor de movimento  $m'$  é dado por

$$m' = \beta m, \quad (3.6)$$

onde

$$\beta = \begin{cases} d_{ch}/\|\mathbf{m}\|, & \text{se } \|\mathbf{m}\| > d_{ch} \\ 1, & \text{demais casos.} \end{cases} \quad (3.7)$$

Portanto, o valor normalizado  $\beta$  ajustará o módulo do vetor de movimento  $\mathbf{m}$  ao máximo deslocamento possível  $d_{ch}$  do agente  $i$  considerando o seu *Convex Hull*.

Finalmente,  $\mathbf{v}$  é calculado de maneira similar à Equação 3.5, portanto

$$\mathbf{v} = s_{\min} \frac{\mathbf{m}'}{\|\mathbf{m}'\|}, \text{ onde } s_{\min} = \min \{\|\mathbf{m}'\|, s'_{\max}\}. \quad (3.8)$$

O processo do cálculo do deslocamento para  $d_{ch}$  começa pela identificação de todas as arestas  $a_{ch}$  que fazem parte do *Convex Hull* de cada agente. Tal processo é calculado através do vetor ortogonal  $\sigma_{ch}^a$  de cada aresta  $a_{ch}$ , contido no mesmo plano do vetor  $\mathbf{m}$  e da aresta  $a_{ch}$ , cujo sentido esteja voltado para o interior do *Convex Hull* do agente  $i$ . A partir desse momento, as arestas que limitarão o deslocamento do agente  $i$  serão as que o produto escalar  $\sigma_{ch}^a \cdot \mathbf{m} < 0$ . Sabendo as arestas que estão à frente do agente  $i$ ,  $d_{ch}$  será o máximo deslocamento possível do círculo que define o agente  $i$ , na direção e no sentido de  $\mathbf{m}$ , isso ocorre até o momento em que este tangencie uma dessas arestas. Caso haja interseção do círculo do agente  $i$  com uma das arestas à frente do agente  $i$ , o valor de  $d_{ch} = 0$ .

### 3.3.4 Padrões comportamentais no modelo de multidões

De acordo com a pesquisa de padrões comportamentais para multidões, foi possível identificar pelo autor dois tipos de comportamentos: inerentes e emergentes.

Os comportamentos inerentes em relação ao deslocamento, referem-se a parte psicológica dos agentes, por exemplo: desejos, emoções e crenças.

Segue abaixo alguns dos principais comportamentos inerentes:

- **deslocar-se ao destino** (*goal seeking*): todo agente no ambiente tem sua origem e destino. Esse comportamento aplicado na simulação de tráfego trás uma grande contribuição, pois os modelos revisados quando tratam de problemas focais não apresentam a forma de onde está sendo gerado o tráfego e também o destino dos veículos. Em redes de médio e grande porte, por exemplo, um problema pode ser resolvido em uma parte da rede e gerar outros conflitos ao longo do percurso, como a alimentação de um sistema tronco por inúmeras sub-redes.

- **deslocar-se evitando colisões** (*collision avoidance*): os agentes no ambiente virtual devem evitar contato com outros agentes e com obstáculos físicos configurados nos cenários de simulação.
- **estratégia do mínimo esforço** (*least effort strategy*): este comportamento significa procurar sempre o menor caminho entre a origem e o destino, fazendo com que a variação de orientação seja minimizada ao máximo. No tráfego real, o motorista escolhe o caminho mais curto e posteriormente o caminho com tráfego mais leve, de acordo com alguma experiência anterior ou algum sistema de informação de tráfego em tempo real.

Os comportamentos emergentes, como o próprio nome descreve, “emergem” de algumas situações não planejadas no ambiente de simulação. Tratam-se de resultados de interações entre agentes e também de interações com o ambiente simulado.

Segue abaixo alguns dos principais comportamentos emergentes:

- **formação de via** (*lane formation*): no mundo real, este efeito é notado em locais onde não há sinalização delimitando os locais para o deslocamento dos veículos, dessa maneira, os agentes ocupam espaços de forma auto-organizada.
- **prévia organização** (*organization prior*): quando duas multidões estão se deslocando em sentidos contrários pode haver a prévia organização de vias. No modelo de veículos, a prévia organização poderá ser interpretada quando os agentes utilizam o espaço de acordo com as suas medidas específicas de largura e comprimento, ou seja, veículos menores como motocicletas, podem ocupar espaços menores no cenário de simulação.
- **efeito de redução da velocidade** (*speed reduction effect*): a medida em que aumenta a densidade de veículos, a velocidade é reduzida, portanto, esse efeito é dependente do número de agentes em relação ao que a via comporta.

Em relação ao efeito da redução de velocidade podem ainda ser apresentados os seguintes comportamentos:

- **efeito de gargalo** (*bottleneck effect*): para o comportamento de pedestres, o efeito de gargalo é representado como um local destinado ao deslocamento onde há uma obstrução física impedindo que o fluxo ocorra normalmente, resultando então em um aumento da densidade na parte anterior a obstrução. No tráfego de veículos o efeito de gargalo pode

ser interpretado como estreitamentos de pista ou até mesmo um acidente onde a mesma situação é percebida.

- **efeito de onda de choque** (*shockwaves effect*): este comportamento emergente ocorre em regiões onde há alta densidade de veículos e por consequência baixa velocidade de deslocamento, fazendo com que sejam gerados os efeitos de ondas de choque. Outro caso que também pode ser entendido como efeito gerador deste tipo de comportamento são as situações chamadas de para-e-anda (*stop-and-go effects*).
- **efeito de canto** (*corners effect*): no contexto das multidões, o espaço disponível para o acesso não é preenchido de maneira regular como ocorre na dinâmica dos fluídos, sofrendo uma redução de velocidade próximo aos cantos do ambiente de simulação. Para a simulação de veículos esse efeito pode ser observado em curvas acentuadas, por exemplo.
- **o efeito de Formação de arco** (*arc formation*) identificado no *BioCrowds*, não contempla nenhum tipo de comportamento identificado no tráfego de veículos. Tal efeito para a simulação de multidões trata da formação geométrica de um arco constituído de pedestres que desejam passar por um determinado acesso.

### 3.3.5 Considerações finais

O presente capítulo apresentou o modelo de simulação *BioCrowds*. O modelo a ser desenvolvido trata-se de uma extensão do modelo de simulação de multidões para o modelo de simulação de veículos.

## 4 O modelo para simulação do tráfego de veículos

Este capítulo apresenta o modelo comportamental bio-inspirado que permite simular o deslocamento de veículos bidimensionais, denominado *BioTraffic*. Por apresentar sua fundamentação em um prévio modelo comportamental, também bio-inspirado, para simular multidões virtuais, este capítulo apresenta, sempre que adequado, as diferenças entre os modelos *BioCrowds* e o *BioTraffic*. Especificamente ao modelo proposto, o texto apresenta as principais características que devem estar presentes em um modelo comportamental de simulação de veículos bidimensionais e como estas são consideradas no modelo *BioTraffic*: calibração dos parâmetros de velocidade e de aceleração, adequação das dimensões dos veículos e restrições de orientação durante o deslocamento, de acordo com as dimensões do veículo adotadas.

### 4.1 Implementação do modelo de simulação de multidões para linguagem multiagentes

O objetivo inicial deste trabalho foi reescrever o código-fonte do modelo *BioCrowds*, implementado na linguagem C, cujo paradigma de programação é estruturado, imperativo e procedural, para uma linguagem de programação que auxilie a implementação de um modelo comportamental na área de sistemas multiagentes. Neste sentido, optou-se pelo NetLogo, que possui uma linguagem cujo paradigma de programação é preponderantemente orientado a agentes, além de possuir um ambiente de desenvolvimento integrado. Portanto, após a reescrita do código-fonte do *BioCrowds* para o ambiente do NetLogo, a proposta do modelo *BioTraffic* pode ser trabalhada.

Inicialmente, verificou-se a finalidade dos marcadores existentes no *BioCrowds* para a proposta de desenvolver um modelo comportamental para agentes cuja geometria e propriedades são de um veículo bidimensional. Manteve-se a ideia original do modelo *BioCrowds*, de que o espaço virtual de simulação no qual os agentes estão inseridos é o único meio pelo qual eles interagem.

Tanto para o *BioCrowds*, como também para o *BioTraffic*, a distância entre os marcadores tem papel fundamental na simulação por dois aspectos, custo computacional e realismo

no movimento dos agentes. Ou seja, quanto maior for o número de marcadores por área, maior será a suavidade do movimento dos agentes, porém maior será o custo computacional. Para não comprometer toda a simulação com o custo computacional gerado pela distribuição dos marcadores, é necessário realizar este processo de forma prévia e exportar o arquivo com os dados do cenário, mantendo-se, assim, um mesmo ambiente de simulação entre as várias realizadas na fase de validação do modelo.

No ambiente do NetLogo, a distribuição dos marcadores pode ser feita de maneira randômica e uniforme para todo o ambiente. Da mesma forma que o *BioCrowds*, o modelo desenvolvido utiliza-se da versão adaptada do algoritmo de “lançamento do dardo” (“*dart-throwing*” *algorithm*) COOK [1986], MITCHELL apud BICHO [2009]. A cada lançamento, o algoritmo calcula se existem outros marcadores que estejam a uma distância menor do que uma mínima predefinida e, se esta condição for satisfeita, o marcador é descartado. Caso contrário, ele é adicionado na área de simulação e um novo processo é iniciado até que todo o cenário de simulação seja preenchido com uma densidade de marcadores previamente definida. No ambiente do simulador também foi disponibilizada a opção da distribuição dos marcadores a partir de um grid regular, cujo intervalo entre os marcadores é a distância mínima.

A densidade de marcadores no ambiente é calculada em  $m^2$ , onde o número total de marcadores distribuídos é dividido pelo número total de *patches* existentes, desde que seja considerado que um *patch* equivale a  $1 m^2$ . Cabe salientar que o total de *patches* depende diretamente da configuração na ferramenta, uma vez que cada ambiente pode ser modificado dependendo do número de faixas a ser simulado. O cálculo realizado é a multiplicação dos *patches* do eixo  $x$  pelos *patches* do eixo  $y$  do ambiente.

A distância mínima entre os marcadores é calculada da densidade de marcadores  $D$  (em  $1 m^2$ ) previamente informada na interface do simulador. Com esta informação, obtém-se a distância mínima  $d_{min}$  a partir do equacionamento  $d_{min} = 2r$  e da aproximação  $r \cong \frac{1}{\sqrt{D\pi}}$ , onde  $r$  é o raio do círculo concêntrico a cada marcador. Quanto menor for a distância entre os marcadores, maior será a densidade de marcadores por área e, por consequência, maior a suavidade do movimento dos agentes.

A Figura 4.1 é composta por duas imagens, uma antes e outra depois de efetuada uma simulação. Em ambas, há um destino (objetivo) no centro em forma de estrela e os marcadores em forma de pontos brancos.

Na figura da esquerda, os agentes (pontos maiores em branco) foram distribuídos

de maneira aleatória e a circunferência que contorna o seu centroide representa o “espaço pessoal”, denominado proxêmica. O termo proxêmica (*proxemics*) foi proposto pelo antropólogo americano Edward Twitchell Hall para descrever o uso sociável do espaço pessoal, área ao redor do indivíduo durante interações e comunicações [BICHO, 2009]. No contexto do modelo proposto, neste espaço estão os marcadores disponíveis no ambiente que representam regiões livres para o deslocamento, e serão adotados para o cálculo do deslocamento de cada agente.

Na figura da direita, os agentes já realizaram o percurso e, por falta de um número maior de marcadores para efetuar o cálculo de deslocamento, percebe-se visualmente que os trajetos (linhas em marrom) apresentam percursos desnecessários da origem ao seu destino. Não havendo nenhum obstáculo, ou disputa com outro agente para alcançar o objetivo, o percurso ideal seria uma linha reta.

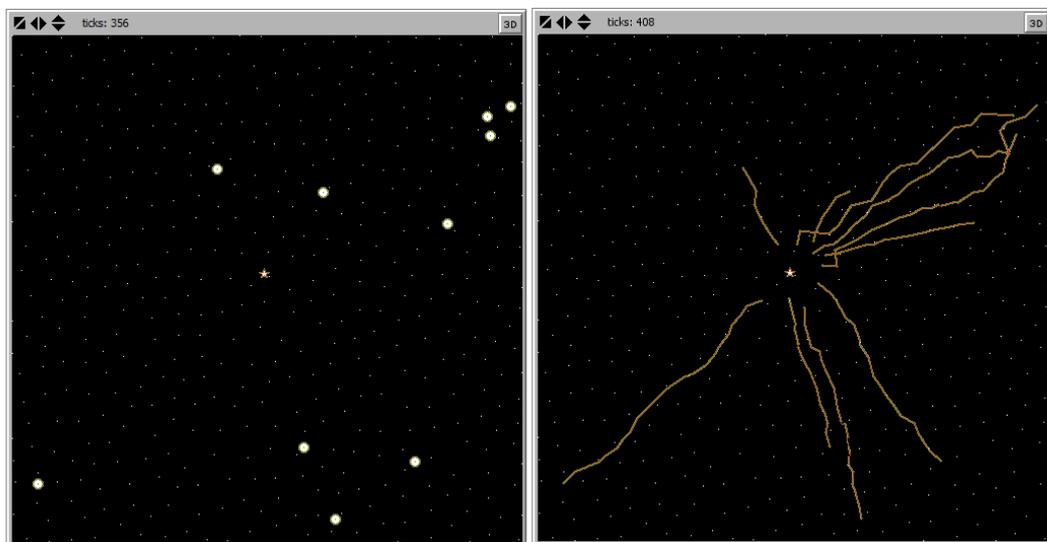


Figura 4.1: *BioCrowds* - simulação com poucos marcadores.

O cenário da Figura 4.2 também é composto por duas imagens, uma antes e outra depois de efetuada uma simulação. Da mesma forma que a figura anterior, há um destino (objetivo) no centro em forma de estrela e os marcadores em forma de pontos brancos. Cabe ressaltar que o número de marcadores nessa simulação é superior ao adotado na simulação supracitada.

Nos mesmos moldes da simulação anterior, a figura da esquerda representa o momento antes da simulação e a figura da direita o término do deslocamento. Comparado com a figura anterior, esta simulação apresenta melhor desempenho em relação ao trajeto percorrido pelos agentes da origem ao destino.

Verifica-se, portanto, que os marcadores são a base no espaço de simulação. É a

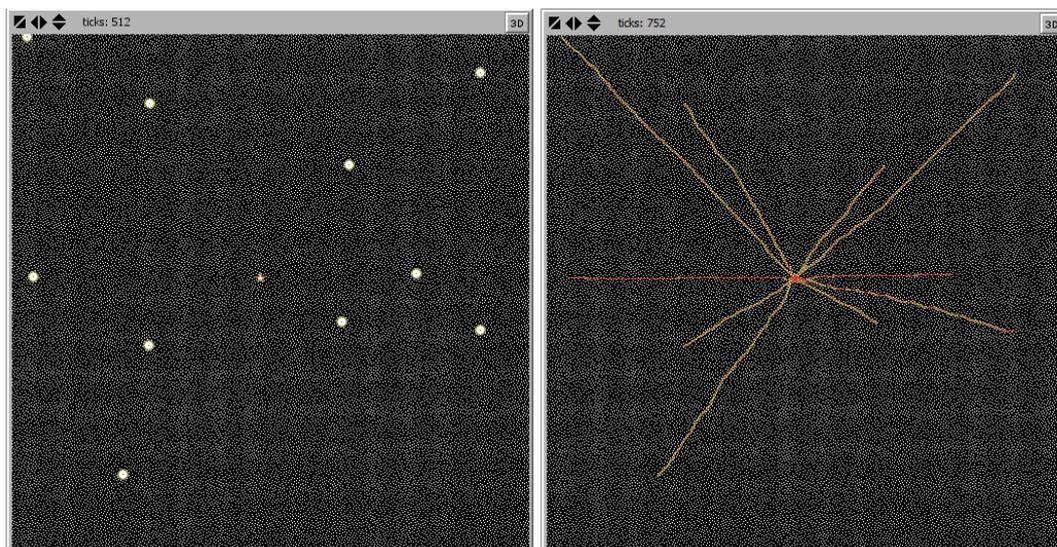


Figura 4.2: *BioCrowds* - simulação com muitos marcadores.

disputa por eles que permite aos agentes se locomoverem das suas origens até seus destinos predefinidos. No modelo *BioCrowds*, os marcadores que ficam no espaço pessoal dos agentes informam uma região livre de colisões, por meio de suas coordenadas espaciais, para o cálculo do deslocamento do agente. Por sua vez, no *BioTraffic*, além da informação espacial, os marcadores disponibilizarão outras informações para o deslocamento dos agentes. O cálculo da velocidade, por exemplo, será realizado considerando a informação de velocidade da via mantida nos marcadores, sendo que esta informação é oriunda de agentes que já efetuaram o deslocamento através dos mesmos marcadores.

Uma outra constatação pode ser observada na Figura 4.3, onde os agentes das extremidades possuem maior possibilidade de deslocamento em relação aos agentes do centro, pois possuem um número maior de marcadores a sua disposição. A Figura 4.3 apresenta os marcadores (segmentos de reta ligados ao agente) e a Figura 4.4 demonstra a representação geométrica dos agentes como pontos verdes.

De acordo com a estratégia do mínimo esforço, a trajetória ideal de um agente, no caso mais simples, é uma linha reta entre seu ponto inicial e o seu destino [BICHO, 2009]. Este caso ocorrerá quando o agente não encontrar nenhum obstáculo, ou outros agentes para a disputa pelo espaço através dos marcadores no cenário de simulação. Na Figura 4.3, agentes que estejam na região periférica do aglomerado provavelmente percorrerão maior distância.

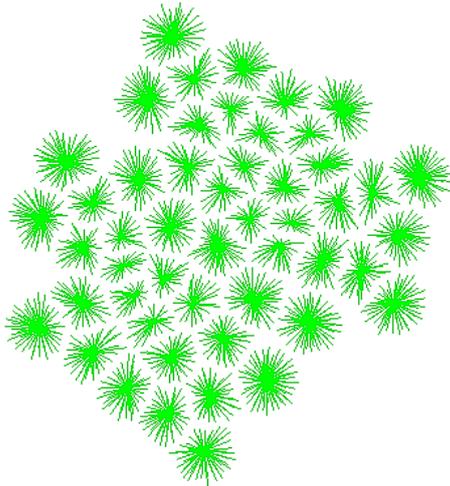


Figura 4.3: Agentes e seus marcadores [BICHO, 2009].

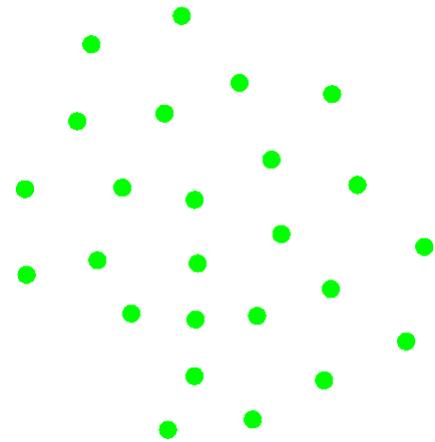


Figura 4.4: Agentes [BICHO, 2009].

## 4.2 Do modelo de multidões para o tráfego de veículos

Segundo OSÓRIO [2009] a evolução histórica dos jogos, e mais especificamente dos jogos de corrida, passou por uma grande sofisticação e melhoria, sempre buscando os realismos: “visual  $\rightarrow$  físico  $\rightarrow$  comportamental”.

Para representar o movimento realizado pelos veículos e suas respectivas restrições, foi iniciada uma fase de investigação sobre veículos autônomos, uma vez que estes necessitam de um esquema próprio para a sua orientação. O modelo que melhor fundamenta a proposta é amplamente utilizado, e o que mais se aproxima da proposta do *BioTraffic* é o modelo de *Ackerman* [OSÓRIO, 2009].

A Figura 4.5 representa o modelo descrito. De acordo com a ilustração: ICR (*Instantaneous Center of Rotation*) representa o ponto de referência externo que serve como base para o veículo realizar a rotação, TR (*Turning Radius*) trata-se de um ponto médio entre as rodas da parte traseira do veículo, SWA (*Steering Wheel Angle*) regula o ângulo giro da direção e L (*Length*) se refere ao comprimento do veículo, particularmente à distância entre os eixos extremos (dianteiro e traseiro).

O *Instantaneous Center of Rotation* tem como finalidade oferecer do ambiente um ponto de referência externo para a orientação, e posteriormente colaborar com os cálculos direcionais junto aos demais pontos no veículo. O *Instantaneous Center of Rotation* alinhado horizontalmente ao ponto mediano no eixo traseiro formam o *Turning Radius*. Com este alinhamento podemos ter a precisão do tamanho do raio que será formado nos momentos em que

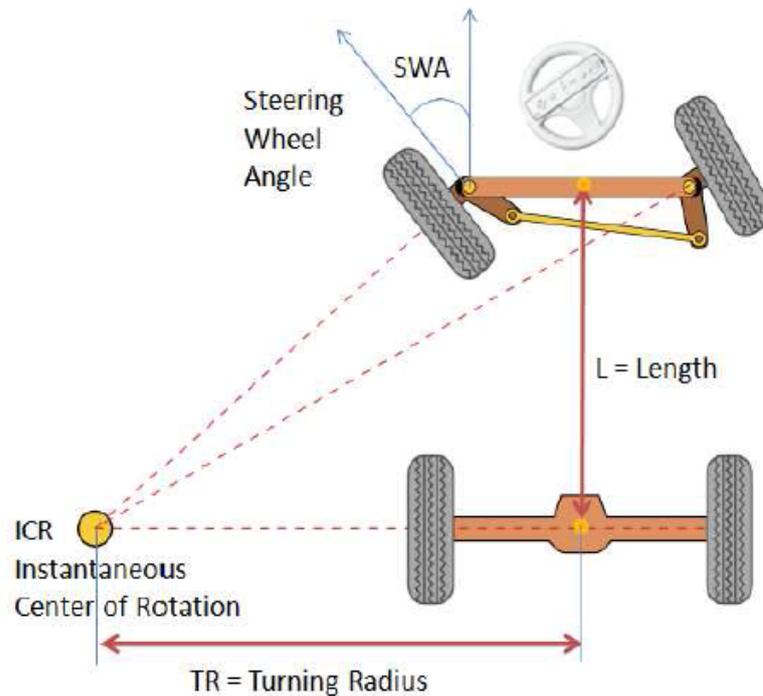


Figura 4.5: Modelo de Ackerman [OSÓRIO, 2009].

o veículo executa algum tipo de manobra na direção. No modelo, o tamanho da barra que liga os dois eixos (dianteiro e traseiro) também influencia no tamanho do raio, ou seja, veículos menores ocuparão um menor espaço quando efetuarem uma curva para a esquerda, por exemplo. Em contrapartida, veículos com uma barra maior necessitarão de mais espaço para efetuar manobras direcionais. Por último, e não menos importante, temos o *Steering Wheel Angle* que varia de acordo com as dimensões do *Turning Radius* e do *Length*, de acordo com a seguinte igualdade  $SWA = \arctan\left(\frac{L}{TR}\right)$ .

A ideia geral do modelo de *Ackerman* foi reinterpretada no ambiente Netlogo valendo-se do cálculo do ângulo *Steering Wheel Angle*, que informa a máxima variação angular da orientação à esquerda ou à direita do veículo. Verifica-se que, no modelo *BioTraffic*, a adoção de um ângulo de percepção dos marcadores pelo agente de valor correspondente a  $2SWA$  produziria o mesmo efeito direcional no veículo. No ambiente do Netlogo, a função *in-cone* recebe dois parâmetros de entrada, que são: o raio do espaço pessoal do agente e o ângulo de percepção, que no caso é  $2SWA$ .

Ao se deslocar, o agente realiza uma variação na orientação que produz um ruído na sua trajetória, ou seja, movimentos desnecessários de orientação em relação ao seu objetivo. Com a intenção de diminuir esse ruído na orientação, foi implementada a média móvel ponderada (*weighted moving average*) [LUCAS and SACCUCCI, 1990], através da equação

$$\mathbf{g} = P\mathbf{g} + (1 - P)\mathbf{m}_{ant}, \quad (4.1)$$

onde  $\mathbf{g}$  é o vetor objetivo,  $\mathbf{m}_{ant}$  é a orientação anterior do agente e  $P$  é o fator ponderação, normalizado, da equação.

Este filtro é aplicado antes do cálculo da orientação do agente. Com a implementação desta equação, a orientação anterior é considerada e se torna um limitante entre a orientação atual e o movimento a ser realizado. Vale destacar que, uma vez que este filtro é aplicado antes da soma vetorial dos vetores posição, o vetor resultante  $\mathbf{m}$ , calculado pela Equação 3.2, fará com que o centroide do agente permaneça na região dos marcadores, mantendo válida a prova matemática que agentes infinitesimais são livre de colisões, como demonstrado em BICHO [2009].

### 4.3 Cálculo da orientação do agente

Os marcadores informam a disponibilidade de deslocamento dos agentes, isto é, as coordenadas espaciais são utilizadas no cálculo da soma vetorial dos vetores direção obtidos a partir de cada marcador contido no espaço pessoal do agente. As equações 3.1, que calcula os vetores direção, 3.2, que encontra o vetor movimento, e a 3.3, que pondera cada vetor em relação ao conjunto de vetores direção, são adotadas no *BioTraffic* como, de fato, são aplicadas no *BioCrowds*. Para o deslocamento do agente  $i$ , em cada mudança da sua posição, há a necessidade de considerar o novo vetor objetivo  $\mathbf{g}(t)$ . Da Equação 3.2, a normalização divide cada um dos vetores pelo somatório dos vetores direção. Deste modo, o resultado será um vetor que se aproxime à orientação do vetor objetivo, uma vez que os vetores com maior peso da normalização são os que estão mais próximos à direção do vetor objetivo.

A parte do *BioCrowds* que trata a colisão entre os agentes considera que cada agente  $i$  ocupe um espaço finito, representado por um círculo de raio  $r$ . No *BioTraffic*, este circunscreveria a geometria do veículo (largura e comprimento). Para que fosse desenvolvida esta solução, o *BioCrowds* utiliza um algoritmo que calcula o polígono convexo, denominado *Convex Hull*, que circunscreve um conjunto de pontos [O'ROURKE, 1998] apud [BICHO, 2009]. Este polígono, por sua vez, envolve o agente não permitindo que entre em colisão com os demais durante a simulação. No NetLogo, o desenvolvimento do *Convex Hull* ficou comprometido pelo custo computacional que o mesmo exerce sobre o modelo. A solução foi desenvolvida fora do ambi-

ente e quando foi incorporada ao modelo não desempenhou satisfatoriamente o que se esperava e, nesta etapa do trabalho, não foi considerada. Apesar do tamanho do veículo ser finito, a chance de colisão é nula, pois a divisão do conjunto de marcadores para cada agente impede o choque.

No que diz respeito à variação angular da orientação, o modelo para veículos deve ser restritivo devido à forma de movimento e de orientação que cada agente deve possuir. Ao encontrar um obstáculo, o pedestre pode efetuar um giro de até  $90^\circ$ , ou mais, para desviar do mesmo e tentar alcançar o seu objetivo. Porém, quanto menor for o ângulo de desvio, melhor será o deslocamento considerando o comportamento do mínimo esforço. Para os veículos, a restrição é maior e limitada por um atributo veicular denominado ângulo de giro. O ângulo de giro leva em consideração o tamanho do veículo (particularmente a distância entre os eixos extremos) e o diâmetro de giro do mesmo.

## 4.4 Cálculo da velocidade do agente

Ao analisar ferramentas computacionais de simulação de tráfego de veículos, percebe-se que a maioria adota um único modelo denominado *car-following*. Este é utilizado para simular uma parte essencial na obtenção de resultados da engenharia de tráfego: o deslocamento dos veículos no ambiente sob estudo. De acordo com OLSTAM and TAPANI [2004], de acordo com a lógica a ser empregada no *car-following*, os modelos são classificados em três classes:

- modelos Gazis-Herman-Rothery (GHR) - modelos que indicam que a aceleração do veículo seguinte (veículo seguido) é proporcional à velocidade do seguidor, sendo que a diferença de velocidade entre ambos é o *headway*.
- modelos de segurança de distância - modelos que calibram a velocidade do veículo seguidor de acordo com um grau de segurança predefinido em relação ao veículo seguido.
- modelos de *car-following* psico-físicos - modelos que utilizam limiares para, por exemplo, ajustar a diferença mínima de velocidade entre seguidor e seguido percebido pela percepção do seguidor.

Os marcadores na área de percepção do espaço pessoal formarão um conjunto que define o perímetro em que os mesmos estão ao alcance do agente, e estes, por sua vez, são

utilizados no momento em que está ocorrendo o deslocamento, repassando informações sobre orientação e velocidade para os agentes. Após serem utilizados, ficam disponíveis para a disputa entre os agentes próximos no deslocamento. O agente só termina o seu deslocamento quando encontra o seu destino, isto é, onde não há mais marcadores a serem disputados no trajeto entre o início e o fim do seu percurso.

No modelo das plantas, as nervuras crescem em uma velocidade constante, enquanto no *BioCrowds* a velocidade possui uma variação de acordo com a disponibilidade de espaço para os agentes. Caso haja espaço disponível, o agente se deslocará na sua velocidade máxima desejada, independentemente da velocidade em que estava anteriormente. O modelo *BioTraffic* contempla a variação da velocidade de acordo com a classe do veículo: VPG (Veículo de Porte Grande), VPM (Veículo de Porte Médio) e VPP (Veículo de Porte Pequeno), sendo estes caracterizados conforme intervalo de valores para os principais atributos de um veículo adotados no modelo *BioTraffic*: comprimento, distância entre eixos extremos, aceleração, velocidade e diâmetro de giro. Estas classes são melhor abordadas na Seção 5.2.

Em relação aos espaço, no modelo *BioTraffic* a “associação” dos marcadores com os agentes é realizada a partir dos agentes, diferentemente do modelo *BioCrowds*, cuja “associação” é realizada a partir dos próprios marcadores. Para garantir que o agente mais próximo a um marcador esteja vinculado a ele, cada marcador possui uma variável que identifica qual agente o está utilizando. Durante o processo de divisão do espaço realizada em cada instante  $t$  de simulação, um marcador pode ter se associado a agentes diferentes em instantes  $t$  diferentes. Mas, ao final do processo, apenas o agente mais próximo está efetivamente associado ao marcador. Portanto, durante o deslocamento dos veículos da origem até o destino, cada marcador utilizado tem sua variável de identificação do agente. No NetLogo, o índice de cada agente, tanto marcador quanto veículos, é um número fornecido através da criação de cada agente no ambiente. Após o término de simulação do agente no mundo, este número, que faz parte de uma lista interna do NetLogo, não retorna para o ambiente.

O movimento de cada agente é calculado iterativamente. A posição  $p(t)$  e o vetor objetivo  $g(t)$  são calculados a cada passo de simulação. Os marcadores contidos no chamado “espaço pessoal” do agente serão armazenados em um conjunto chamado  $S$ .

Conforme mencionado anteriormente, os marcadores não informarão apenas uma referência espacial do cenário. Uma abordagem integrando o conceito de raciocínio de terrenos (*terrain reasoning*) ao modelo de multidões *BioCrowds* foi proposta no trabalho de CASSOL

[2011]. Neste trabalho, os marcadores não servem apenas como referência espacial no ambiente simulado para o cálculo da orientação dos agentes, mas também outros atributos que permitem diferenciar áreas dentro do ambiente. Neste trabalho, os marcadores identificam três possíveis regiões de percurso no terreno: caminháveis, preferencialmente não-caminháveis e não-caminháveis. As características do terreno são criadas através de um algoritmo que fornece pesos diferentes para cada região diferenciada.

Na Figura 4.6 foi ilustrado um cenário com dois tipos de terrenos: em vermelho, marcadores com o atributo de não-caminháveis, e em cinza, marcadores caminháveis.

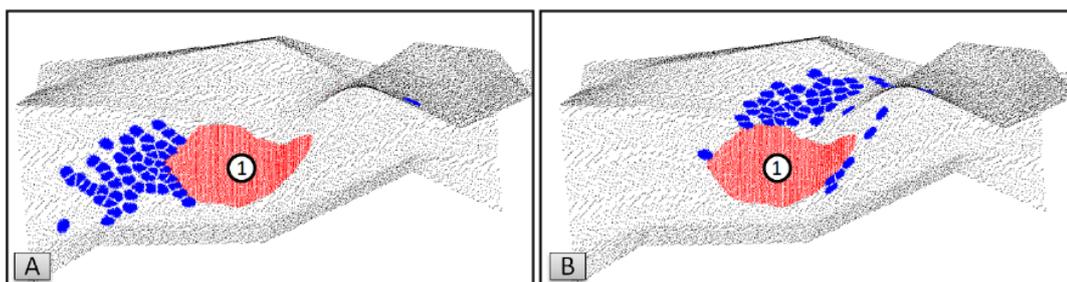


Figura 4.6: Evolução da trajetória de agentes com dois tipos de marcadores: caminháveis e não-caminháveis [CASSOL, 2011].

No presente trabalho, para o cálculo da velocidade do agente no simulador de tráfego de veículos será adotada a ideia de raciocínio de terrenos, mas com uma proposta diferente do definido na metodologia proposta por CASSOL [2011]. No *BioTraffic*, os marcadores informam, por meio de um de seus atributos (uma variável chamada “capacidade de serviço”), a atual velocidade máxima da via. Esta informação será adotada para o cálculo da velocidade de deslocamento dos veículos em relação ao que é permitido na faixa, de acordo com o limite máximo de velocidade previamente estipulado para a faixa ou do fluxo veicular atual. Além desta informação relacionada à velocidade, os marcadores permanecem sendo referência geométrica para o cálculo do deslocamento do agente.

A variável “capacidade de serviço”, que informa a atual velocidade da via, associada a cada marcador, tem seu valor alterado após o agente ter regulado sua velocidade em função do valor nela contido. Após esta informação ter sido repassada ao agente, a variável é então alterada com o valor da velocidade atualizada do agente, que poderá ser o valor previamente informado por este mesmo marcador ou um valor menor. A informação de velocidade atualizada é utilizada para os próximos veículos na via, deixando, assim, o registro da velocidade atual do último agente que passou por aquele marcador. No momento em que o marcador

não tiver um agente associado, o valor da variável sofre um incremento constante a cada iteração, arbitrado no início da simulação. Desta maneira, a informação da velocidade máxima da via, inicialmente atribuída a todos os marcadores, é recuperada após um determinado intervalo de tempo.

A partir da realização de todas as configurações iniciais, a simulação pode ser executada. Como no *BioCrowds*, cada vez que o agente  $i$  se movimenta na simulação, é necessário realizar a atualização da sua posição  $p(t)$  e, conseqüentemente o vetor objetivo  $g(t)$ . O conjunto  $S$  contém todos os marcadores da área de percepção do agente  $i$  no cenário de simulação, sendo  $S = \{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ . Portanto, o cálculo para o próximo deslocamento do agente  $i$  deve ser realizado definindo-se o conjunto de vetores direção, de acordo com a Equação 3.1.

O modelo de multidões possui uma velocidade máxima instantânea, ou seja, dado o início da simulação, todos os agentes começam a se movimentar sem qualquer fator de aceleração atribuído. Portanto, um agente, no *BioCrowds*, pode partir da imobilidade para a máxima velocidade em  $1/30$  s, considerando um *framerate* de 30 FPS na simulação. A partir deste momento, a velocidade se mantém constante até o final da simulação, caso o agente não encontre obstáculos ou a densidade de marcadores não seja alterada. Portanto, no *BioTraffic*, uma das contribuições para a extensão do modelo de simulação de multidões é reproduzir realisticamente a variação de velocidade dos agentes durante a simulação. Isso foi possível através da inclusão do Movimento Retilíneo Uniformemente Variado (MRUV) no modelo.

Inicialmente, é calculada a velocidade média da capacidade de serviço de todos os marcadores do conjunto  $S$ , denominado  $vel_{\text{capacidade de serviço}}$ , a partir da equação:

$$vel_{\text{capacidade de serviço}} = \frac{\sum_{k=1}^N \text{capacidade de serviço}_k}{N}. \quad (4.2)$$

E define-se que  $vel_{\text{ref}} = vel_{\text{capacidade de serviço}}$

Esta velocidade média será então comparada à velocidade limite definida para cada agente, denominada  $vel_{\text{lim}}$ , determinando qual deverá ser a velocidade de referência para o agente, denominada  $vel_{\text{ref}}$ , a partir da seguinte equação:

$$vel_{\text{ref}} = \begin{cases} vel_{\text{lim}}, & \text{se } vel_{\text{lim}} < vel_{\text{ref}} \\ vel_{\text{ref}}, & \text{nos demais casos.} \end{cases} \quad (4.3)$$

A partir da definição desta velocidade de referência, será possível verificar qual

deverá ser a aceleração de referência do agente, denominada  $accel_{ref}$ , valendo-se da  $vel_{ref}$  e da aceleração limite definida para cada agente, denominada  $accel_{lim}$ . Para tanto, cada agente possui uma variável que informa a sua atual velocidade, denominada  $vel$ .

Assim sendo, a aceleração do agente é inicialmente calculada por meio da seguinte equação do MRUV:

$$accel_{ref} = \frac{vel_{ref} - vel}{t}. \quad (4.4)$$

Posteriormente é confrontada com a aceleração limite definida para cada agente, por meio da equação

$$accel_{ref} = \begin{cases} accel_{lim}, & \text{se } accel_{lim} < accel_{ref} \\ accel_{ref}, & \text{nos demais casos.} \end{cases} \quad (4.5)$$

Após, obtém-se o deslocamento de referência do agente, conforme a aceleração de referência, em um instante de tempo da simulação:

$$s_{ref} = vel.t + \frac{accel_{ref}.t^2}{2}. \quad (4.6)$$

Obtido o deslocamento de referência  $s_{ref}$ , esta variável apresenta o mesmo objetivo da variável  $s_{max}$ , na Equação 3.5. Temos, então, a seguinte equação no *BioTraffic* para o vetor de movimento instantâneo, em unidades de deslocamento por mudança de posição (cada iteração):

$$\mathbf{v} = s_{min} \frac{\mathbf{m}}{\|\mathbf{m}\|}, \text{ onde } s_{min} = \min \{\|\mathbf{m}\|, s_{ref}\}. \quad (4.7)$$

Na Equação 4.7 nota-se que, caso  $\|\mathbf{m}\| > s_{ref}$ , o máximo deslocamento do agente é limitado por  $s_{ref}$ . De outra forma, o deslocamento é dado por  $\|\mathbf{m}\|$ .

Por fim, o valor da variável  $vel$  é atualizada de acordo com a equação de Torricelli:

$$vel = \sqrt{vel^2 + 2.accel_{ref}.\|\mathbf{v}\|}. \quad (4.8)$$

Após o deslocamento do agente, é necessário atualizar a capacidade de serviço dos marcadores que estavam associados ao agente. Do conjunto de marcadores contidos no conjunto  $S$  do agente, somente aqueles que estejam atrás, considerando sua orientação, terão seus valores de capacidade de serviço atualizados. Novamente, a função *in-cone*, citada na seção 4.3, foi

utilizada. Para que fosse possível selecionar os marcadores que estejam atrás do agente, o seu vetor orientação foi momentaneamente alterado para o seu oposto, ou seja, com mesmo módulo, mesma direção, mas sentido oposto. Após, a função *in-cone* selecionou um subgrupo dos marcadores, adotando como parâmetros o raio do espaço pessoal do agente e um ângulo que varia conforme o número de faixas. No presente trabalho, os valores do ângulo adotados foram de  $180^\circ$ , nas simulações de uma única faixa, e  $2 \cdot \arctan(2/R)$ , nas simulações com duas faixas, considerando a largura da via igual a  $4m$  e  $R$  o raio de percepção.

O cálculo para o deslocamento do agente poderia ser realizado tanto pela cinemática quanto pela dinâmica. Entretanto, optou-se pela cinemática, pois a movimentação dos corpos independe da causa neste modelo de simulação. Os veículos possuem diferenças na geometria, na potência motora e na frenagem, o que poderia ser usado como justificativa para o uso das leis de Newton, mas isso não será tratado na implementação deste modelo. Os ajustes que serão feitos em relação das dimensões das classes de veículos serão abordados na seção 5.2.

## 4.5 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas as três principais contribuições do *BioTraffic* para simular realisticamente o movimento de veículos: a readequação da orientação, a calibração da velocidade e a configuração das dimensões dos agentes e ambiente simulados.

## 5 Resultados obtidos

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através das simulações realizadas no modelo *BioTraffic*. Após efetuar as simulações, os resultados são confrontados com os resultados obtidos pelo simulador de tráfego AIMSUN, *software* comercial de tráfego de veículos para simular tanto vias urbanas quanto autoestradas.

### 5.1 Geração do fluxo de entrada na via

A geração do fluxo de entrada na via no AIMSUN é dada pelo intervalo de tempo entre a entrada de dois veículos no ambiente de simulação. Na engenharia de tráfego o nome desse intervalo é *headway*. O AIMSUN possui os seguintes modelos de entrada, conforme distribuição amostral: exponencial, uniforme, normal, constante, "ASAP" e externa [AIMSUN, 2013b]. Uma vez que a entrada exponencial é apresentada como *default* pelo simulador, esta foi implementada no simulador *BioTraffic*, através do Algoritmo 2. A Figura 5.1 apresenta o gráfico com as entradas de veículos utilizando o *headway* de entrada como uma distribuição exponencial.

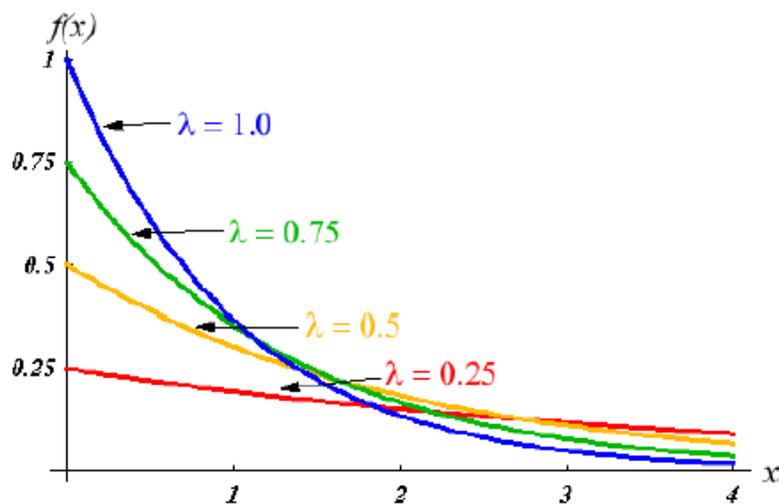


Figura 5.1: Headway de geração de fluxo dos veículos [AIMSUN, 2013b].

**Algoritmo 2:** Algoritmo para geração exponencial do fluxo de veículos.**Entrada:**  $\lambda$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $maxfloat$ **Saída:**  $headway$ 

- 1:  $u = random(0, 1)$
- 2: **se**  $\lambda > 0.0$  **então**
- 3:      $t = ((-1/\lambda) * \ln(u))$
- 4: **senão**
- 5:      $t = maxfloat$
- 6: **fim se**

Portanto, o mesmo tempo de  $headway$  calculado no AIMSUN será calculado no *BioTraffic*. O fluxo de entrada é dado por  $\lambda$ , se este valor for maior que 0, e o progresso de tempo é fornecido por  $1/\lambda$  segundos de simulação.

Outra distribuição de entrada de veículos é realizada pelo modo constante, sendo apresentado no Algoritmo 3.

**Algoritmo 3:** Algoritmo para geração constante do fluxo de veículos [AIMSUN, 2013b].**Entrada:**  $\lambda$ ,  $v$ ,  $t$ ,  $maxfloat$ **Saída:**  $headway$ 

- 1: **se**  $\lambda > 0.0$  **então**
- 2:      $t = 1/\lambda$
- 3: **senão**
- 4:      $t = maxfloat$
- 5: **fim se**

## 5.2 Dimensões do agente e do ambiente de simulação

Nesta seção são apresentadas a configuração das dimensões do ambiente de simulação e o tamanho dos agentes.

Para implementação das medidas (largura e comprimento) dos veículos e do cenário do mundo real para o virtual, foi realizado o cálculo da média dos tamanhos dos veículos, transformando-os em medidas padrão para três classes que farão parte do novo modelo de simulação: Veículo de Porte Pequeno (VPP), Veículo de Porte Médio (VPM) e Veículo de Porte Grande (VPG).

A Figura 5.2 demonstra um gráfico com as medidas resultantes deste cálculo. Em azul está o comprimento médio de cada classe de veículo e em laranja a largura.

Para a construção destas três classes de veículos, foi necessário realizar um levantamento através de catálogos das montadoras. O cálculo das medidas dos veículos foi realizado

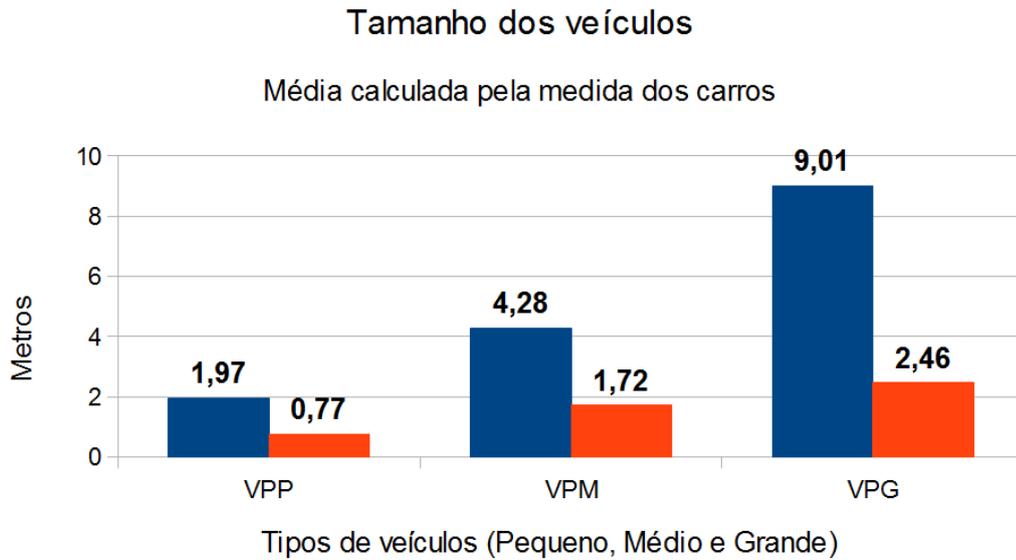


Figura 5.2: Comprimento e largura para as classes de veículos VPP, VPM e VPG.

da seguinte maneira: foram somadas todas as medidas de largura dos veículos que constavam no catálogo, e posteriormente dividido pelo número total de veículos. Esse mesmo cálculo foi realizado para o comprimento.

Para os veículos de porte pequeno (VPP), foi utilizado a medida de vinte e um produtos do catálogo das motocicletas da montadora Honda [HONDA, 2013]. Para os de porte médio (VPM), o cálculo foi realizado através da média entre vinte e um veículos da montadora Fiat [FIAT, 2013], e para os de porte grande (VPG), a média foi calculada através de trinta e três veículos da marca Mercedes Benz [MERCEDES-BENZ, 2013]. As médias calculadas do comprimento de cada classe foram: VPG 9,01 metros, VPM 4,28 metros e VPP = 1,97 metros.

O ambiente para a configuração das medidas é dividido em *patches*, definindo que cada unidade representa um  $1 m^2$ . O editor de formas (*shapes*), disponível no NelLogo, apresenta quatro quadrantes contendo  $10 \times 10$  pequenos quadrados em cada (Figura 5.3). O tamanho da forma do agente no editor não ultrapassa o valor do tamanho de um *patch*. Entretanto, ao inserir a forma editada, é possível escalar o tamanho do agente de acordo com a média dos comprimentos dos veículos. A forma do veículo foi definido com um comprimento igual a  $19/20$  quadriláteros do editor, como representa a Figura 5.3. Este fator de proporcionalidade é utilizando ao escalar a forma para as médias dos comprimentos calculadas.

Os resultados obtidos no *BioTraffic* serão confrontados com os obtidos no AIM-SUN. Portanto, a largura média que é aplicada na ferramenta comercial será reinterpretada

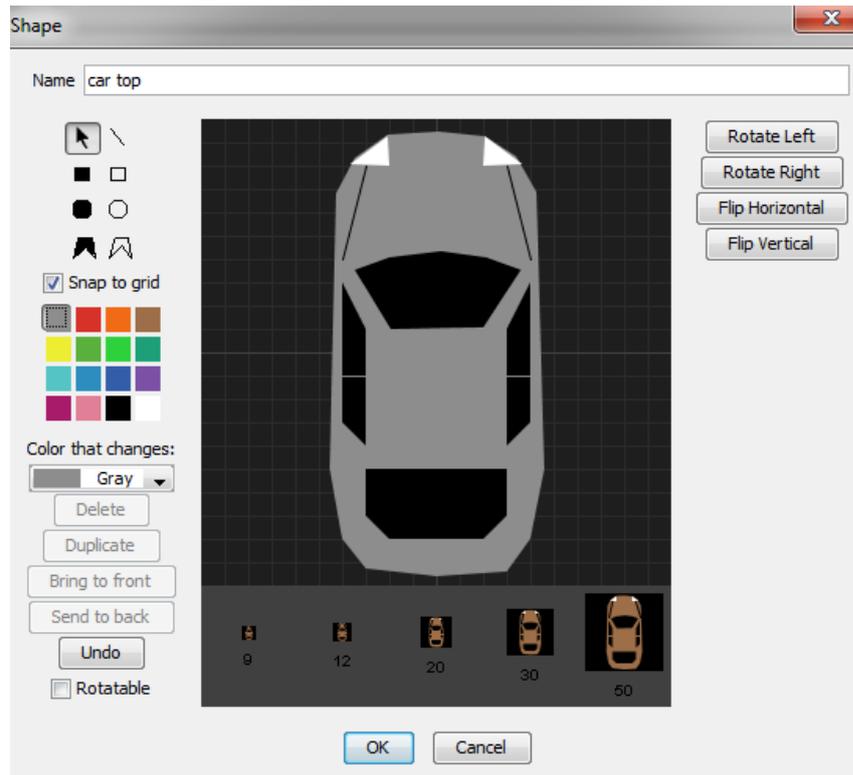


Figura 5.3: Editor de shapes da ferramenta NetLogo.

no simulador implementado. Por padrão, o simulador comercial carrega as seguintes classes de veículos e suas respectivas medidas: veículos de porte médio, denominado *car*, com 4 m de comprimento, veículos de porte grande, denominado *bus*, com 12 m de comprimento. O AIMSUN não possui VPPs correspondentes dentre os modelos que disponibiliza que, no caso, seriam motocicletas. Outros elementos do tráfego que não serão implementados no *BioTraffic* e que possuem classes predefinidas no AIMSUN são: *bicycle*, *pedestrian*, *public class*, *taxi*, *truck* e *it van*.

Efetuada a transposição do tamanho de cada classe de veículo, será necessário definir a equivalência para a montagem do resto do cenário de simulação, como a largura e o comprimento das faixas. Repassar todo o cenário real para o virtual, significa tornar proporcional as medidas do mundo para o *software* de simulação.

O ambiente será configurado com mil *patches* na horizontal (eixo  $x$ ), que equivale ao comprimento de um quilômetro de faixa de simulação. Para a largura, será definido quatro *patches* na vertical (eixo  $y$ ), que corresponde a uma faixa de simulação. Em casos de simulações com mais de uma faixa, o número de *patches* é multiplicado pelo valor unitário de uma faixa. Ou seja, para duas faixas de veículos teremos oito *patches* na vertical. Conforme normas para o projeto das estradas de rodagem do departamento nacional de infraestrutura de transporte

(DNIT) [DNIT, 1973], cada faixa tem sete metros de largura. Porém, na ferramenta de validação uma faixa tipo *freeway* possui 3,5 metros e esta será a medida adotada. Como o NetLogo não possui número de *patches* fracionado, será realizado um arredondamento de 3,5 para 4 *patches* por faixa.

### 5.3 Análise da adaptação do modelo de tráfego de veículos com o modelo de multidões

Durante a fase de implementação do simulador de tráfego de veículos *BioTraffic*, num primeiro momento, foi necessário a criação do modelo *BioCrowds* na ferramenta NetLogo. Após isso, foi possível realizar as adaptações propostas para o simulador *BioTraffic*.

A restrição angular pode ser observada na Figura 5.4. No primeiro momento, é posicionado um veículo próximo ao seu objetivo, mas com a direção da sua orientação paralela ao eixo  $y$ , no sentido crescente. Ao iniciar a simulação, sem nenhuma restrição angular, o veículo deveria fazer um giro de  $90^\circ$  sobre seu centroide e seguir para o objetivo, uma vez que este é o comportamento esperado de um humano virtual em um simulador. Na mesma figura, ao lado, podemos perceber, com o rastro deixado pelo veículo, que o mesmo efetuou o giro de acordo a restrição angular imposta.

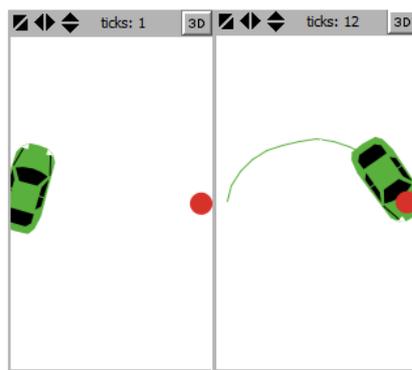


Figura 5.4: Restrição angular da orientação do veículo.

O comportamento do *BioCrowds* pode ser observado na Figura 5.5, onde o veículo instantaneamente gira  $90^\circ$  sobre seu centroide, de modo que a orientação esteja para o seu objetivo, e descreve a trajetória conforme o rastro, diferentemente de veículos anteriores que estavam com a restrição angular.

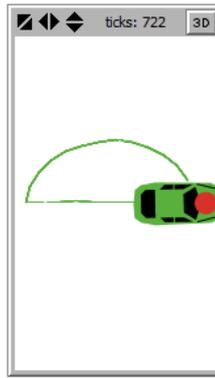


Figura 5.5: comportamento BioCrowds.

Quando o agente efetua a simulação sem a restrição ele adota o método de calcular o seu percurso através da posição do seu ponto de origem até o seu ponto de destino. Para a simulação de veículos, foi adotada a ideia de usar a função “*in-cone*” do Netlogo, que tem como entradas o tamanho do raio da área que o agente deve observar e o ângulo de abertura desta área. O raio de percepção é definido no início da simulação e o ângulo de visão é o ângulo de giro calculado a partir das dimensões do veículo.

Efetuada a simulação, de acordo com os parâmetros do *BioCrowds*, os veículos percorrem o ambiente com certo ruído na orientação durante o seu deslocamento. Para que esse ruído fosse minimizado, foi implementado um filtro que retorna a média ponderada entre a orientação atual do agente e do objetivo desejado. Sem o uso do filtro, a orientação do agente é calculada sem considerar a orientação anterior, e com o filtro há uma ponderação, considerando a orientação anterior do agente. Aplicando este filtro, o agente realiza um movimento mais suave durante o seu deslocamento.

Na Figura 5.6 são apresentados resultados alterando gradativamente, e de modo decrescente, a ponderação do filtro. O primeiro quadro (canto superior esquerdo) a ponderação considera 0% do orientação anterior do agente e 100 da orientação do objetivo. O veículo, com a frente voltada para a parte superior da tela, efetua o movimento da origem ao destino sem considerar a orientação anterior, respeitando o seu ângulo de orientação calculado para alcançar seu objetivo. A medida em que a ponderação sofre um decréscimo (figuras na sequência), o veículo necessita realizar o trajeto usando uma curva com maior ângulo de giro para alcançar o objetivo desejado.

Dessa forma, durante a simulação, se o veículo considerar mais a orientação anterior do que a orientação para o destino, o seu movimento durante o deslocamento terá maior

suavidade se comparado com outra configuração que oferte maior preferência para a orientação de destino.

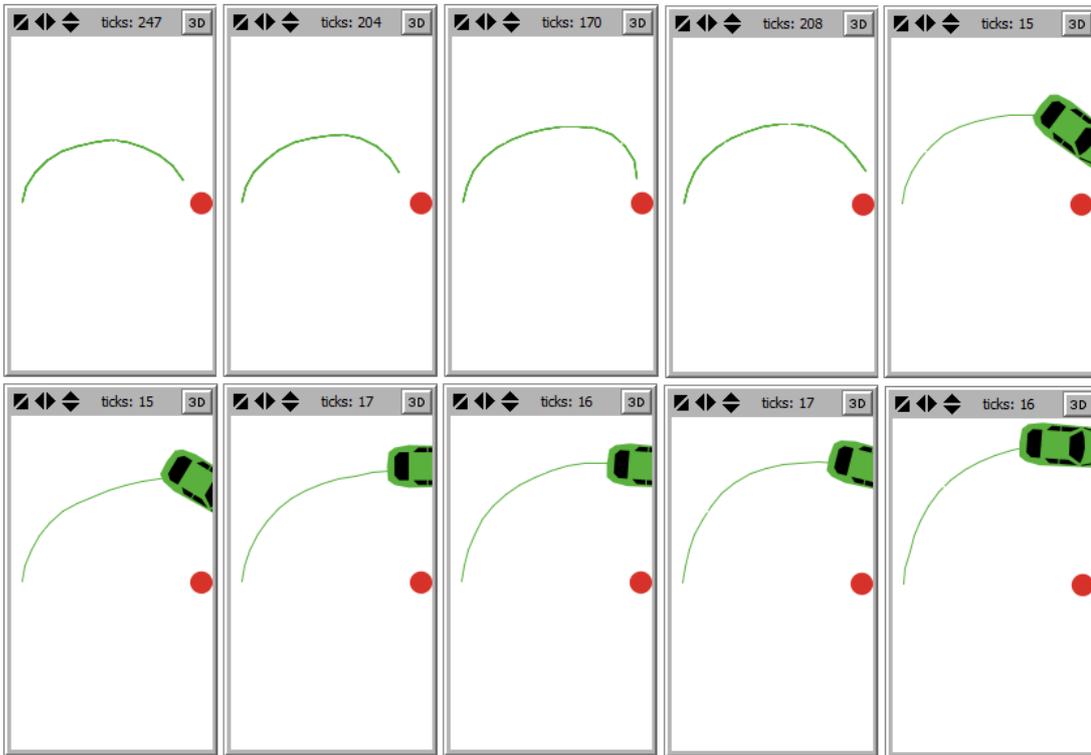


Figura 5.6: Ponderação escalada.

## 5.4 Comparação dos resultados com o simulador AIMSUN

A validação do modelo desenvolvido foi realizada comparando resultados com o simulador de tráfego AIMSUN. No simulador comercial, os dados de entrada para a realização de uma implementação são: tamanho da faixa, centroide de origem dos veículos, centroide de destino dos veículos, tipos de veículos informados através de uma matriz origem-destino, demanda de tráfego, velocidade máxima permitida e tipo de faixa.

Em relação aos resultados extraídos do simulador comercial, por se tratar de simulações estáticas, não foi necessário realizar uma série rodadas e médias entre as suas saídas.

A Figura 5.7 mostra a interface do simulador comercial AIMSUN. Na parte superior são localizados os controles de simulação, na parte direita ficam os itens de projeto e na esquerda os botões de criação da infraestrutura.

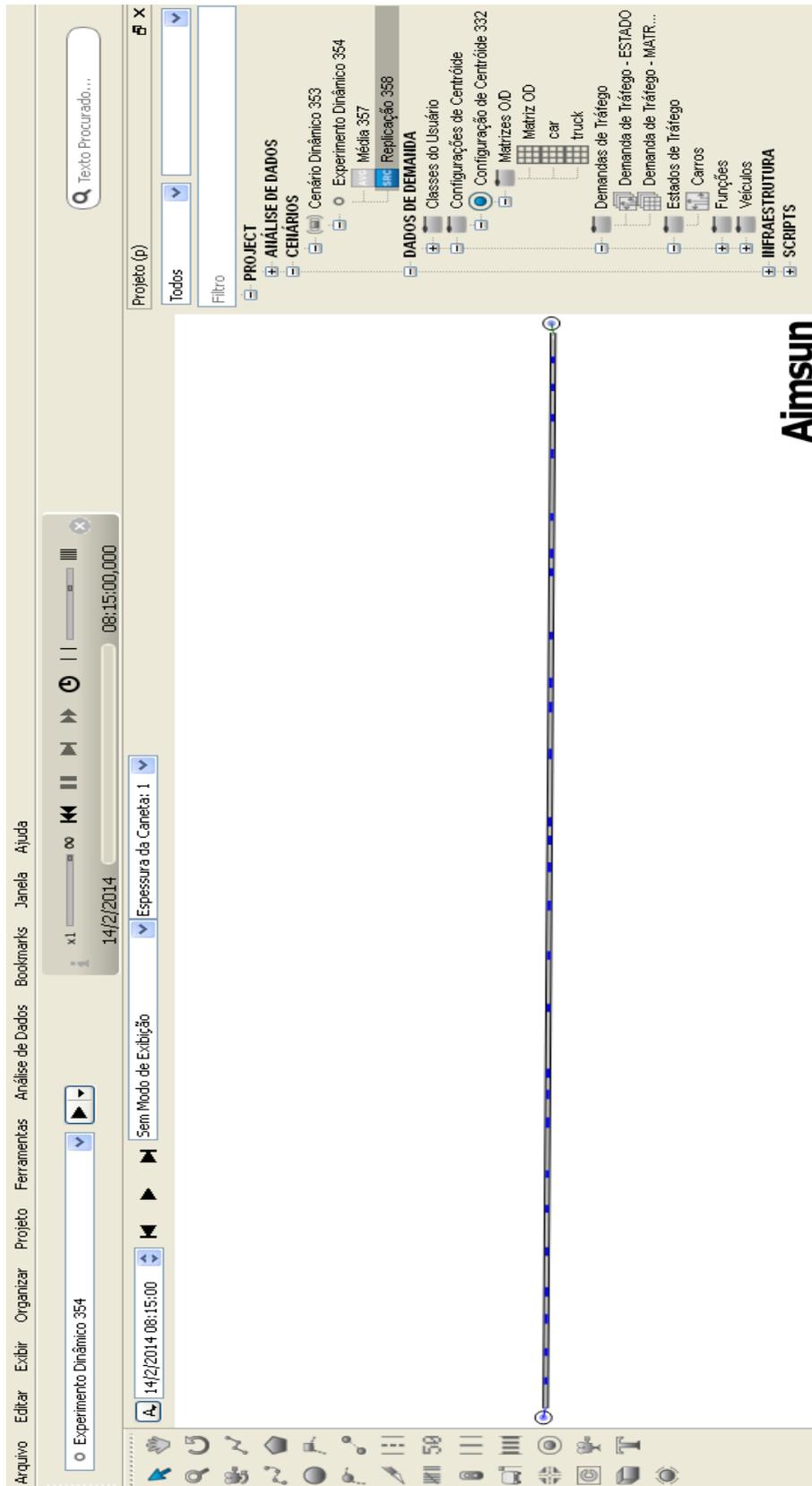


Figura 5.7: Ambiente de simulação no simulador de veículos AIMSUN.

Os valores da Tabela 5.1 foram setados tanto na simulação realizada no AIMSUN, quanto na simulação realizada no *BioTraffic*.

<b>Entrada</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Número de faixas	2	unidades
Tipo de faixa	<i>freeway</i>	nenhum
Velocidade máxima da faixa	120	km/h
Largura da faixa	3,5	m
Comprimento da faixa	1	km
Comprimento do veículo	4	m
Aceleração do veículo	3	$m/s^2$
Velocidade limite do veículo	110	km/h
Fluxo de tráfego	3600	veic/h
Tempo de simulação	5	min
Tempo de coleta de dados	1	min

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada no AIMSUN.

A Figura 5.8 apresenta a interface do Netlogo com a implementação do modelo *BioTraffic*: o lado esquerdo da figura apresenta alguns monitores dos resultados da simulação, a parte central estão os controladores dos parâmetros de entrada e do lado direito a parte das plotagens gráficas das capturas de resultados.

As entradas de dados apresentadas na Tabela 5.2 fazem parte apenas da simulação no *BioTraffic*.

<b>Entrada</b>	<b>Valores</b>	<b>Unidades</b>
Raio de percepção dos agentes	7.3	m
Densidade de marcadores	1.3	$m^2$
Diâmetro de giro	10	m
Distância entre os eixos extremos	60	% em relação ao tamanho do veículo

Tabela 5.2: Parâmetros de entrada no *BioTraffic*.

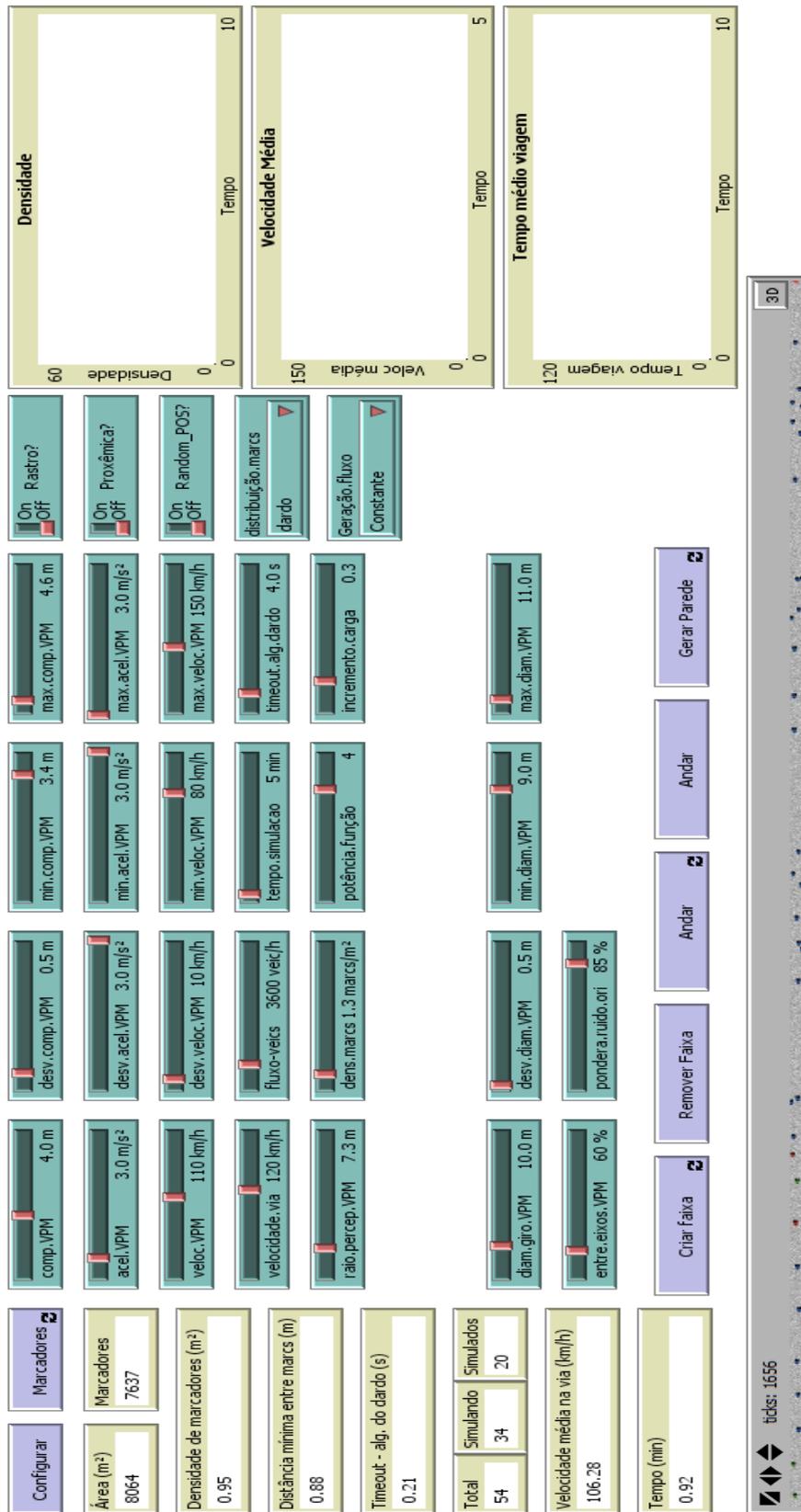


Figura 5.8: Ambiente de simulação desenvolvido para o BioTraffic.

Verifica-se, com os valores atribuídos ao comprimento médio do veículo, que alguns valores definidos no modelo servem de parâmetro para uma função randômica que segue uma distribuição como descrito na Figura 5.9, e se justificam de acordo às predefinições do software AIMSUN. A distribuição normal apresentada na figura mostra como a função randômica se comporta de acordo com a distribuição das medidas previamente configuradas. O valor médio encontra-se na parte central da figura, enquanto o desvio padrão representado para mais ou para menos pela parte hachurada e os valores máximo e mínimo como limitantes.

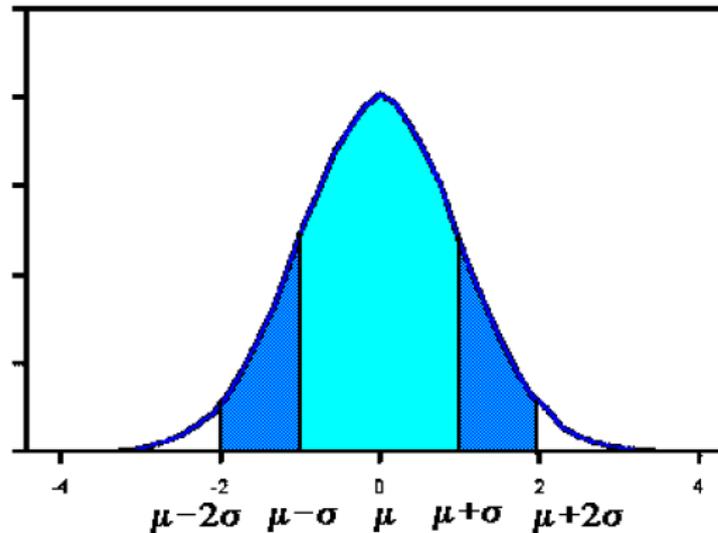


Figura 5.9: Distribuição Normal.

Para as simulações realizadas, foram definidas as medidas de um veículo de acordo com o utilizado no modelo *car* do software AIMSUN.

Outra configuração necessária para entender o comportamento de um veículo, principalmente em manobras de ultrapassagens, é a “distância entre eixos”. Esta medida é a distância do eixo dianteiro do veículo até o eixo traseiro do mesmo. Para o simulador desenvolvido, este parâmetro foi definido como um percentual em relação ao comprimento total do veículo. O diâmetro de giro calculado e aplicado sobre a geometria do veículo (*shape*) garante que o movimento do agente seja fiel ao que está sendo definido, e também a sua geometria em relação ao mundo.

Não somente o comprimento médio do veículo, mas as demais medidas acima adotaram a distribuição normal. Portanto, durante as simulações, não existe uma medida fixa dos parâmetros para os veículos, assim como em um ambiente real, mas sim uma medida obtida pela distribuição adotada. Os valores da aceleração dos veículos também apresentam esta distribuição, mas para os experimentos realizados foi definido em  $3 \text{ m/s}^2$  para os valores médio,

desvio, mínimo e máximo.

Após serem definidas as configurações de entrada de dados foram realizadas dez simulações no NetLogo, pois o modelo desenvolvido apresenta resultados dinâmicos. Da mesma forma foram realizados os experimentos para o simulador comercial que apresenta resultados estáticos. Feito isso, foi calculada a média dos resultados entre cada simulador e posteriormente a comparação de resultados. Como mencionado anteriormente, são simulações de cinco minutos, sendo que os resultados apresentados são obtidos a cada minuto.

As coletas de dados obtidas a cada minuto apresentaram 60 veículos em cada. Multiplicando-se os valores obtidos pelo tempo total de simulação, tem-se 300 veículos no total de cada experimento. Na configuração do estado de tráfego do AIMSUN, foi indicado que o mesmo receberia um fluxo de entrada de 3600 veículos por hora. Portanto, multiplicando-se o fluxo de um experimento de cinco minutos por doze horas (considerando a hora cheia), temos os mesmos 3600 veículos por hora.

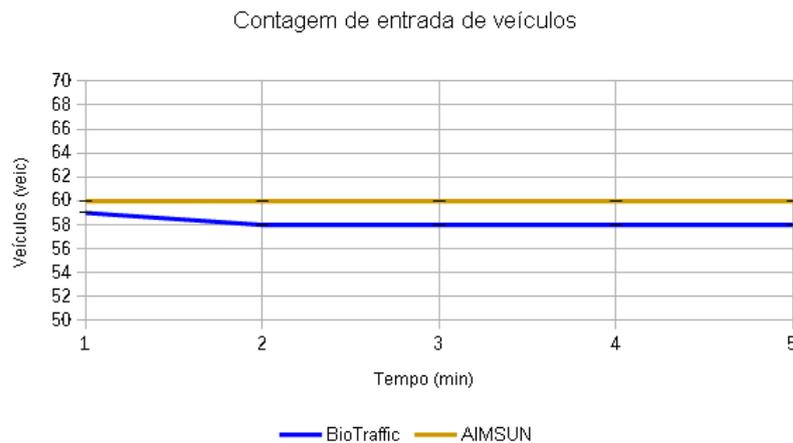


Figura 5.10: Fluxo de entrada de veículos na via.

Por sua vez, o *BioTraffic* teve um fluxo de entrada médio de 291 veículos, estando próximo ao fluxo ideal, se comparado com o simulador comercial AIMSUN. Valendo-se do mesmo cálculo para verificar o fluxo por hora, o modelo apresenta um fluxo de 3492 veículos por hora.

Na primeira coleta o simulador desenvolvido apresenta 59 veículos e nas demais 58. Isso ocorre pelo fato de que ao iniciar uma simulação há necessidade de adicionar um agente no ambiente de simulação. Portanto, a diferença de entrada de veículos entre os dois simuladores é 2 veículos a cada coleta de dados. Possivelmente essa diferença é gerada pela precisão do Algoritmo 3.

O sistema de cálculo para a densidade dos veículos é dado pela seguinte equação:

$$DEN_{sys} = \frac{\sum_{t_i \in T} NVeh_{t_{(i-1)}} * (t_i - t_{(i-1)})}{I} * 1000, \quad (5.1)$$

onde:

$L$  = significa da soma de todas as faixas (em metros) da rede de tráfego simulada,

$NVeh_t$  = número de veículos que estão na rede da simulação em um instante de tempo  $t$ ,

$I$  = intervalo de tempo em segundos,

$T = (0, t_1, \dots, t_m, I)$  = instante de tempo quando o número de veículos é alterado na rede.

A Figura 5.11 representa a comparação da média entre as densidades de veículos dos experimentos realizados. Em um primeiro instante, o *BioTraffic* apresenta uma maior densidade, se comparado ao primeiro minuto do simulador AIMSUN, estabilizando nos demais minutos. Os resultados da simulação de ambos se equivalem pouco antes da segunda coleta de dados, onde o simulador AIMSUN continua aumentando a sua densidade até a terceira coleta, momento onde passa a ter um pequeno decaimento de densidade na simulação.

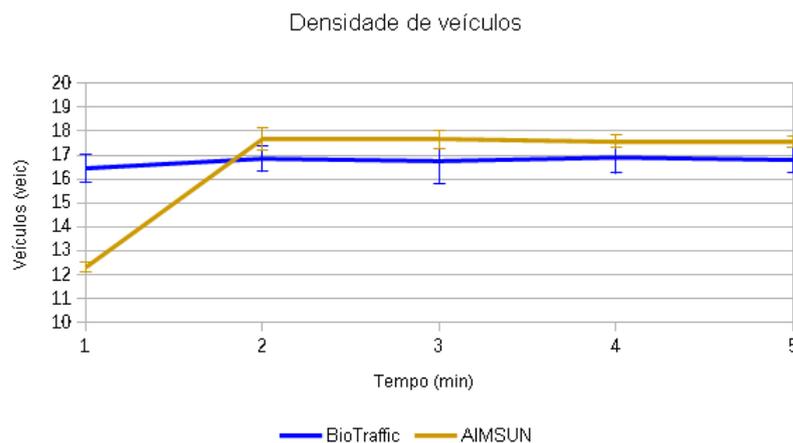


Figura 5.11: Densidade de veículos na via.

Outra saída de dados comparada foi o tempo de viagem realizado por veículo. A equação que realiza este cálculo é dada por:

$$TT_i = \frac{TEX_i - TEN_i}{D_i} * 1000, \quad (5.2)$$

onde:

$TT_i$  = tempo médio viajado por km de cada veículo num instante medido em segundos,

$TEN_i$  = tempo de entrada dos veículos na rede em segundos,

$TEX_i$  = tempo de saída dos veículos na rede em segundos.

A Figura 5.12, apresenta uma oscilação nos valores dos tempos de viagem do simulador comercial e uma curva crescente, após a primeira coleta de dados, nos valores do modelo proposto. As linhas formadas pelos números dos resultados, mesmo sendo próximas, não apresentam o mesmo comportamento pelo fato do modelador desenvolvido não ter um balanceamento de distribuição dos valores para a velocidade dos veículos durante a simulação. No AIMSUN, mesmo que um veículo esteja sozinho na via, a velocidade de condução não é constante, diferentemente do *BioTraffic*.

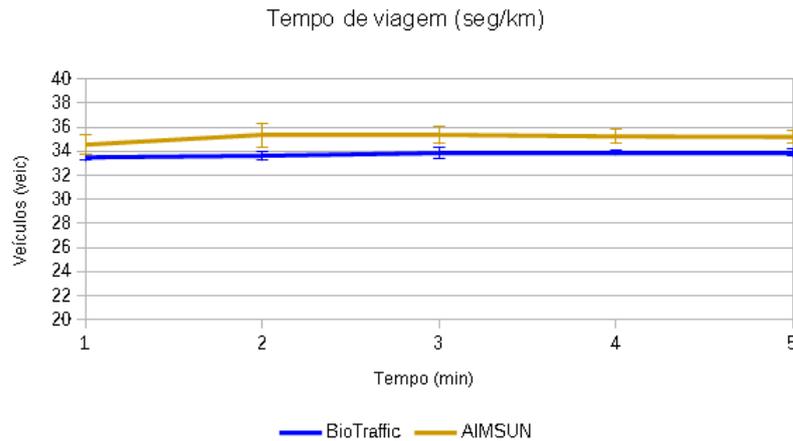


Figura 5.12: Tempo de viagem dos veículos durante a simulação.

Por fim, a última comparação de dados realizada é entre a média da velocidade dos veículos. A equação que calcula esta variável é:

$$S_i = \frac{D_i}{TEX_i - TEN_i}, \quad (5.3)$$

onde:

$S_i$  = média da velocidade, em metros por segundo,

$TEN_i$  = tempo de entrada dos veículos na rede, em segundos,

$TEX_i$  = tempo de saída dos veículos na rede, em segundos,

$D_i$  = distância total percorrida pelos veículos na rede, em metros.

Na Figura 5.13 pode-se observar que, o simulador de tráfego de veículos AIMSUN, apresenta a maior velocidade média entre os veículos apenas no final da simulação. Ao contrário do *BioTraffic*, que logo na primeira coleta de dados (no primeiro minuto de simulação), atinge 107,84 *km/h*. Como o processo de deslocamento é dado pela disputa pelo espaço no ambiente simulado, automaticamente a velocidade dos veículos decresce no decorrer do percurso. Enquanto isso, o simulador comercial apresenta algumas oscilações durante o processo. As velocidades de ambas simulações se aproximam apenas no final do experimento. Todas as médias do *BioTraffic* ficam acima dos 105 *km/h*, enquanto o AIMSUN, na maior parte das coletas, manteve a média da velocidade abaixo deste valor durante a simulação.

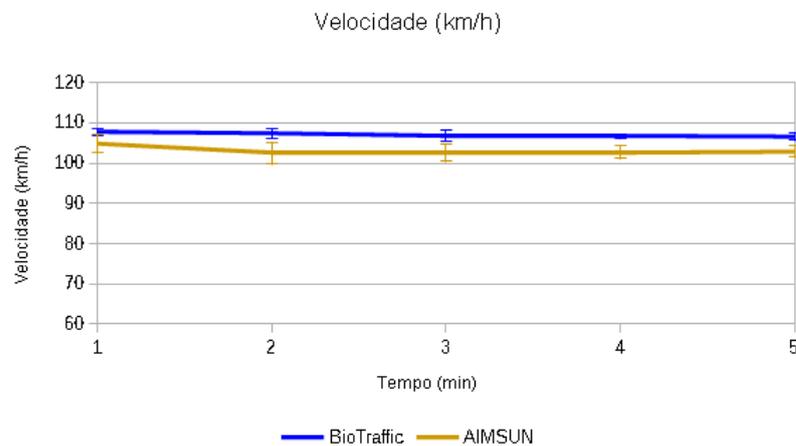


Figura 5.13: Velocidade média dos veículos na via.

No simulador comercial existe uma série de dados para calibração, além dos que foram aqui apresentados durante os resultados obtidos. Apenas na classe de veículos (*car*), para simulações com modelos dinâmicos, podemos calibrar os seguintes itens: aceitação de velocidade, distância mínima entre veículos, tempo de preferência máximo, aceitação de ser guiado, tempo de reação, reação para o veículo da frente, desaceleração, fator de sensibilidade, *headway* mínimo, porcentagem de ultrapassagem, entre outras que não influenciariam nos dados aqui comparados.

## 5.5 Validação do cálculo da velocidade do agente

O Netlogo possui o seu tempo de simulação calculado em *ticks* e uma taxa de quadros por segundo (*framerate*) configurável. Para as simulações do *BioTraffic*, foi adotada uma

taxa de 30 quadros por segundo. Portanto, para que fosse obtido o tempo real de simulação, foi necessário calcular o número de *ticks* dividindo por 30 para a obtenção do tempo real. O tempo de simulação é dado pela multiplicação do tempo escolhido por 1800, sendo assim, uma simulação que recebeu como configuração quatro minutos, realizará o experimento em um total de 7200 *ticks*. Também foi necessário realizar duas conversões de medidas, uma de metros por segundo (*m/s*) para quilômetros por hora (*km/h*), multiplicando a velocidade pelo fator 3,6 e a operação inversa dividindo por este mesmo valor.

A equação da velocidade média é dada por:

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (5.4)$$

Onde  $\bar{v}$  é a velocidade média,  $\Delta s$  é o intervalo de deslocamento entre a posição inicial e a posição final e, por fim,  $\Delta t$ , que é o intervalo de tempo, pode-se definir que, se um veículo se deslocar a uma velocidade de 100 *km/h* em um percurso de 1 *km*, obteremos a variação do tempo, portanto, manipulando a equação anterior, teremos:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{\bar{v}}, \quad (5.5)$$

O deslocamento efetuado pelo veículo é realizado em 0,01 hora. Se convertermos este resultado para segundos teremos,  $\Delta t = 0,01 \times 60 \times 60$  (multiplicação por minuto e, posteriormente por segundos). Por fim, um veículo com velocidade de 100 *km/h* percorre 1 *km* de faixa em 36 *s*. Se convertemos 36 segundos para *ticks* teremos um total de 1080 *ticks* de simulação.

Para a aferição da velocidade de deslocamento no *BioTraffic*, foi definido um cenário com apenas um veículo, que percorre o ambiente de simulação do *patch* 0 até o 1000 e este, por sua vez, teve o seu percurso realizado com 1080 *ticks* de simulação.

Através das análises e cálculos apresentados, podemos concluir que o simulador desenvolvido de fato reproduz o comportamento de velocidade para os agentes em um deslocamento de 1 *km* de simulação.

## 5.6 Análise das classes de veículos

O espaço que os veículos ocupam no cenário de simulação é controlado pelo seu comprimento. De acordo com a seção 5.2, os veículos são classificados como: VPP (Veículos de Porte Pequeno), VPM (Veículos de Porte Médio) e VPG (Veículos de Porte Grande).

As medidas criadas através da média de uma série de veículos também foi abordada na seção, e ficaram da seguinte forma: VPP 1,9 m, VPM 4,3 m e VPG 9,0 m. Para analisar a influência dessas medidas nas simulações, foram realizados experimentos com o padrão de cada uma delas.

A Tabela 5.3 apresenta as mediadas que foram configuradas como parâmetro de entrada no simulador *BioTraffic*. Para o desenvolvimento do experimento, cada classe de veículos recebeu os dados referentes ao seu comprimento, desvio e comprimento mínimo e máximo.

Classe	Comprimento (m)	Desvio (m)	Comprimento mínimo (m)	Comprimento máximo (m)
VPP	1,9	1	0,9	2,9
VPM	4,3	1	3,3	5,3
VPG	9	1	8	10

Tabela 5.3: Medidas das classes de veículos.

O simulador *BioTraffic* apresenta resultados dinâmicos, por isso se faz necessário uma determinada quantidade de simulações. Portanto, foram realizadas dez rodadas de simulação para cada classe de veículos (VPP, VPM e VPG) e a média dos resultados entre essas rodadas é apresentado na Tabela 5.4.

Analisando a tabela, é possível constatar que quanto menor for o comprimento do veículo, maior será o número de “simulandos” (agentes que ainda não chegaram no objetivo) e, por consequência, menor será o número de “simulados” e a velocidade média do ambiente de simulação.

Durante os experimentos, foi possível notar que as simulações com os VPP’s geravam paradas de alguns veículos no cenário de simulação. A Figura 5.14 apresenta a imagem de como os agentes ficam parados no ambiente de simulação. Como o comprimento do agente é consideravelmente curto (se comparado as classes VPM e VPG), ao se deslocar ele tem um menor poder de reação para desvios devido ao “cone” de visualização de marcadores que está a

Classe	Total	Simulando	Simulados	Velocidade (km/h)
VPP	59	41	18	102,29
VPM	59	31	27	106,92
VPG	59	32	24	105,35

Tabela 5.4: Resultados das simulações por classe de veículo.

sua frente. Com isso, ao realizar um movimento de giro próximo das laterais do ambiente de simulação, o agente não consegue desviar e acaba parando no caminho. Portanto, outros agentes na sequência terão um espaço de faixa mais estreito para o deslocamento, gerando congestionamento durante a simulação. No momento em que os veículos param na faixa os marcadores da sua área de percepção permanecem “ocupados” e, com isso, os demais agentes não podem utilizar os mesmos para o deslocamento.

Cabe salientar que não foi implementado qualquer tipo de regra de ultrapassagem durante o movimento dos veículos. Isso poderia resolver o problema do travamento de veículos de porte pequeno no ambiente, pois, se estivessem em uma via com duas faixas, os agentes localizados na faixa da esquerda tentariam ultrapassar pela direita, e os agentes da faixa da direita tentariam ultrapassar pela esquerda, ao contrário do que acontece atualmente no simulador. Atualmente, os agentes tentam ultrapassar pelo lado da via aonde existe menos espaço.

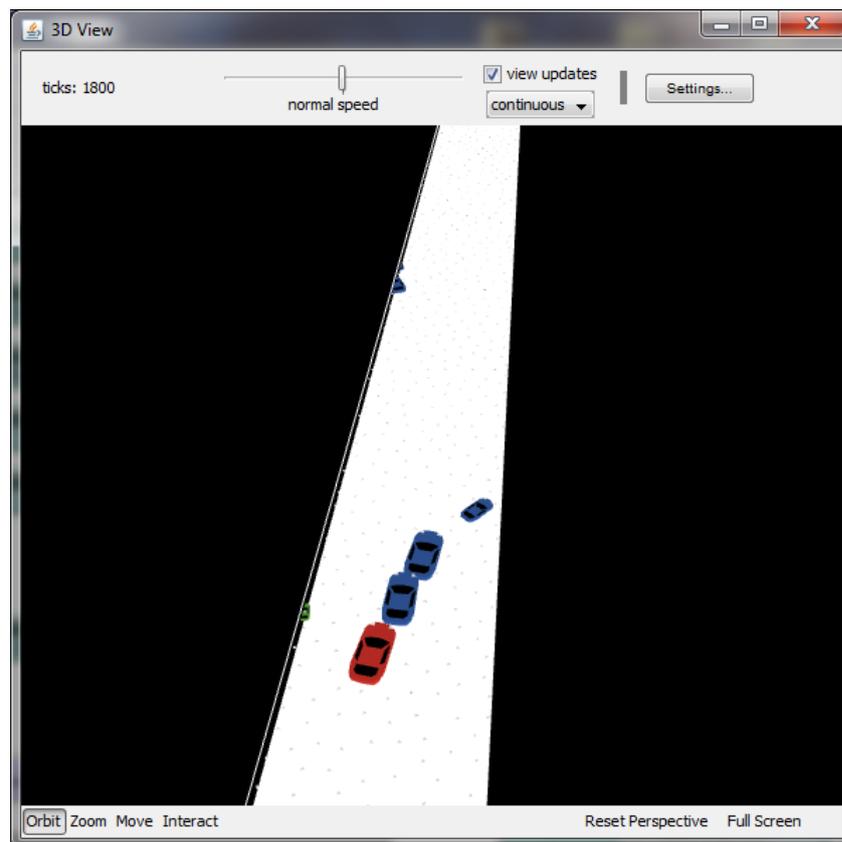


Figura 5.14: Veículos de pequeno porte parados.

## 6 Conclusão

O presente capítulo apresenta a conclusão do trabalho de desenvolvimento do modelo comportamental bio-inspirado para a geometria veicular bidimensional, o *BioTraffic*.

### 6.1 Contribuições da pesquisa

De acordo com a revisão realizada entre os trabalhos relacionados, não foi encontrado nenhuma proposta com metodologia similar dentro dessa linha de pesquisa. Cabe ressaltar que, a forma de ocupação do espaço de simulação, durante o deslocamento dos agentes em ambientes virtuais é fator importante para o desenvolvimento de um modelo comportamental fidedigno de tráfego.

Tanto as ferramentas quanto os modelos propostos na literatura utilizam-se de variações do método *car-following* para as suas propostas, pois há carência de novos tipos de metodologias e modelos para suprir a parte da ocupação do espaço de simulação e deslocamento de tráfego de veículos. Acredita-se que com esse novo modelo de movimentação dos agentes no cenário de simulação, possamos ter uma qualidade melhor nos resultados, se comparado a outros modelos na literatura.

A transferência do modelo de multidões para a ferramenta Netlogo apresentou a possibilidade de prosseguir com a pesquisa e desenvolver o modelo para o tráfego de veículos. Dessa forma, podemos determinar que o modelo consegue simular, por meio geometrias bidimensionais, o controle de pedestres em ambientes virtuais. Com a implementação do modelo concluída, há possibilidade de efetuar alguns ajustes e unir os dois modelos de simulação. Esta proposta não foi apresentada, pois não fazia parte do escopo da dissertação. Mas como o desenvolvimento do *BioTraffic* era a consequência da implementação do *BioCrowds* no Netlogo, podemos efetuar tal conclusão.

Através de comparações entre os dados extraídos das simulações, foi constatado que o modelo desenvolvido apresentou, de forma quantitativa, uma aproximação dos resultados de um simulador de tráfego de veículos comercial. Cabe salientar que, a ferramenta comercial utilizada nas validações dos resultados possui um certo número de entradas de dados que não fo-

ram implementadas através dessa proposta, caso fosse, possivelmente teríamos um refinamento nos resultados obtidos.

Através do raciocínio de terrenos foram implementadas formas de compreensão de como os agentes podem mapear um deslocamento sem a necessidade de interação com outros agentes no ambiente, pois no modelo desenvolvido, a interação dos veículos emerge pela falta de recurso para o deslocamento e não pela presença de outros agentes no cenário.

Os comportamentos desejados para a simulação foram ajustados com base no simulador AIMSUN. Algumas informações não foram encontradas nas documentações disponíveis mas, por algumas análises comportamentais, foi percebido que estas se faziam presentes, como o controle entre eixos.

As configurações do ambiente foram extraídas de fontes externas e também da ferramenta de validação. Portanto, foi possível reinterpretar as medidas dos percursos de acordo com o que é existente nas faixas. A largura das faixas e o comprimento foram descritos da mesma forma que implementado no simulador AIMSUN, fato este comprovado nas simulações, pois se houvesse qualquer tipo de discrepância nestas informações as simulações não teriam ocorrido como é apresentado na Seção 5.4.

Por fim, caberia ainda algumas simulações confrontando o tráfego real de veículos ou comparações entre modelos estatísticos e matemáticos sobre controle de tráfego.

## 6.2 Trabalhos futuros

Com a criação do modelo de tráfego de veículos *BioTraffic*, há possibilidade de inclusão de algumas funcionalidades que não foram abordadas nesta pesquisa, por exemplo:

- a inserção de comportamentos nos agentes poderia melhorar o realismo em determinados tipos de simulações. Traçar o perfil de um grupo de motoristas e adicioná-lo no ambiente proposto é algo que os simuladores ainda não possuem. O trabalho de KESTING et al. [2007], por exemplo, apresenta o modelo MOBIL (*Minimizing Overall Braking Induced by Lane Change*), modelo para derivar regras de mudanças de faixas baseado em uma variável que vai de um comportamento cooperativo até egoísta. O trabalho de SILVA [2014] aplica a modelagem de emoções utilizando redes bayesianas, este é outro tipo de abordagem a ser investigada para implementação de características de desejos nos

motoristas dos veículos do simulador;

- a incorporação do *ConvexHull* no modelo garante que o agente  $i$  mantenha uma distância mínima predefinida (baseado no raio  $r$  do agente) das arestas do polígono. Com isso, garante-se que o deslocamento do agente fique livre de colisões;
- na parte de raciocínio de terrenos, poderiam ser especificadas capacidades de serviço com pesos diferentes nos marcadores. Desta forma, seria possível identificar faixas com fluxos diferentes (faixas de mão dupla), adotar um peso maior de relevância para marcadores que serviriam para ultrapassagens, entre outras possibilidades.

## Referências Bibliográficas

- AIMSUN. Aimsun 8 dynamic simulators users manual. Acesso em: jun. 2013, 2013a. URL Disponível em: <<http://www.aimsun.com/wp/>>.
- AIMSUN. Aimsun 8 dynamic simulators users manual. Acesso em: dez. 2014, 2013b. URL Disponível em: <<http://www.aimsun.com/wp/>>.
- S. et al. ALGERS. Review of micro-simulation models. *Smartest Project; Institute for Transport Studies, University of Leeds*, pages 1–66, August 1997.
- G.K. et al. ANDRIOTTI. Desenvolvimento de um sistema livre para simulação de tráfego baseada em modelos microscópicos. *Workshop sobre Software Livre, 5.; Fórum Internacional Software Livre, 5., Porto Alegre*, pages 73–76, 2004.
- R. et al. BARLOVIC. Metastable states in cellular automata for traffic flow. *The European Physical Journal B*, 5(3):793–800, March 1998.
- J.A. BARRIA and S. THAJCHAYAPONG. Detection and classification of traffic anomalies using microscopic traffic variables. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(3):695–704, September 2011.
- A. BAZZAN, J. WAHLE, and F. KLUGL. Agents in traffic modelling-from reactive to social behaviour. *KI-99: Advances in Artificial Intelligence; Annual German Conference on Artificial Intelligence: Advances in Artificial Intelligence*, 23., pages 303–306, 1999.
- M. et al. BEHRISCH. Sumo - simulation of urban mobility: An overview. In *SIMUL 2011, The Third International Conference on Advances in System Simulation*, pages 63–68, Barcelona, Spain, October 2011.
- A.L. BICHO. *Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado*. PhD thesis, Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, 2009.

- M. BRACKSTONE and M. MCDONALD. Car-following: a historical review. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2(4):181–196, 1999.
- BRASIL. Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997. institui o código de trânsito brasileiro., 1997. URL Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/ctb.htm>>. Acesso em: 13 maio. 2014.
- T. BUI, D. NGO, and C. TRAN. Multi-agent based simulation of traffic in vietnam. *Principles and Practice of Multi-Agent Systems*, pages 636–648, 2012.
- Vinícius. CASSOL. Simulação de grupos de agentes virtuais utilizando raciocínio de terrenos., 2011.
- D. CHOWDHURY, L. SANTEN, and A. SCHADSCHNEIDER. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems\* 1. *Physics Reports*, 329(4-6):199–329, 2000.
- Robert L. COOK. Stochastic sampling in computer graphics. *ACM Transactions on Graphics*, 5(1):51–72, January 1986.
- DNIT. Normas para o projeto das estradas de rodagem. Acesso em: abr. 2013, 1973. URL Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/rodovias/operacoes-rodoviaras/faixa-de-dominio>>.
- J. ESSER and M. SCHRECKENBERG. Microscopic simulation of urban traffic based on cellular automata. *International Journal of Modern Physics and Computer*, 8(5):1025–1036, 1997.
- FIAT. Catálogo de produtos. Acesso em: maio. 2013, 2013. URL Disponível em: <<http://www.fiat.com.br/monte-seu-carro/>>.
- M. FLORIAN, M. MAHUT, and N. TREMBLAY. Application of a simulation-based dynamic traffic assignment model. *European Journal of Operational Research*, 189(3):1381–1392, September 2008.
- Peter G. GIPPS. A behavioural car-following model for computer simulation. *Transportation Research Part B: Methodological*, 15(2):105–111, April 1981.
- A. et al. HELBING. Micro-and macro-simulation of freeway traffic. *Mathematical and Computer Modelling*, 35(5):517–547, March 2002.

- D. HELBING. Traffic and related self-driven many-particle systems. *Reviews of Modern Physics*, 73(4):1067, December 2001.
- P. HIDAS. Modelling lane changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(5-6):351–371, October/December 2002.
- P. HIDAS. Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 13(1):37–62, February 2005.
- HONDA. Catálogo de produtos. Acesso em: abr. 2013, 2013. URL Disponível em: <<http://www.honda.com.br/motos/Paginas/default.aspx>>.
- IBM. Ibm global commuter pain study reveals traffic crisis in key international cities. Acesso em: jun. 2014, 2010. URL Disponível em: <<http://migre.me/qSm3f>>.
- Arne KESTING, Martin TREIBER, and Dirk HELBING. General lane-changing model mobil for car-following models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1999(1):86–94, 2007.
- A. et al. KOTSIALOS. Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool metanet. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 3(4):282–292, December 2002.
- G KOTUSEVSKI and K. A. HAWICK. A review of traffic simulation software. *Research Letters in the Information and Mathematical Sciences*, 13:35–54, 2009.
- S. KRAUSS, P. WAGNER, and C. GAWRON. Metastable states in a microscopic model of traffic flow. *Physical Review E*, 55(5):5597–5602, May 1997.
- M.J. LIGHTHILL and G.B. WHITHAM. On kinematic waves. ii. a theory of traffic flow on long crowded roads. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 229(1178):317–345, May 1955.
- S. et al. LIM. Stochastic motion planning and applications to traffic. *Algorithmic Foundation of Robotics VIII*, pages 483–500, 2009.
- E.B. LIMA. Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares. 2007.
- James M LUCAS and Michael S SACCUCCI. Exponentially weighted moving average control schemes: properties and enhancements. *Technometrics*, 32(1):1–12, 1990.

- X. MA and I. ANDRÉASSON. Behavior measurement, analysis, and regime classification in car following. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 8(1):144–156, 2007.
- MERCEDES-BENZ. Catálogo de produtos. Acesso em: maio. 2013, 2013.  
URL Disponível em: <<http://www.mercedes-benz.com.br/HomeInterna.aspx?categoria=3>>.
- Don P. MITCHELL. Generating antialiased images at low sampling densities. pages 65–72. Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH), ACM Press.
- K. NAGEL and M. SCHRECKENBERG. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2(12):2221–2229, December 1992.
- Johan Janson OLSTAM and Andreas TAPANI. Comparison of car-following models. Technical report, 2004.
- Joseph O’ROURKE. *Computational Geometry in C*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998.
- Fernando Santos et al. OSÓRIO. Simulação virtual de carros em jogos e aplicações de ia. pages 1–20, October 2009.
- S. PANWAI and H. DIA. Comparative evaluation of microscopic car-following behavior. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 6(3):314–325, 2005.
- L. S. PORTUGAL. *Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem*, volume 1. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 2005.
- T. POTUZAK. Comparison of road traffic network division based on microscopic and macroscopic simulation. In *International Conference on Modelling and Simulation Computer, 13.*, pages 409–414. IEEE, 2011.
- C.W. REYNOLDS. Flocks, herds and schools: a distributed behavioral model. In *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, volume 21, pages 25–34. ACM, 1987.
- M. et al. RICKERT. Two lane traffic simulations using cellular automata. *Physica A: Statistical and Theoretical Physics*, 231(4):534–550, October 1996.

- Adam RUNIONS, Brendan LANE, and Przemyslaw PRUSINKIEWICZ. Modeling trees with a space colonization algorithm. pages 63–70. Eurographics Workshop on Natural Phenomena, Eurographics Association, 2007.
- J. et al. SEWALL. Virtualized traffic: Reconstructing traffic flows from discrete spatiotemporal data. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17(1):26–37, January 2011.
- Jason SEWALL, David WILKIE, and Ming C. LIN. Interactive hybrid simulation of large-scale traffic. *ACM Transaction on Graphics*, 30(6):1–18, December 2011.
- Felipe Neves da SILVA. Modelagem de emoções utilizando redes bayesianas, 2014.
- Y. et al. SUGIYAMA. Traffic jams without bottleneck experimental evidence for the physical mechanism of the formation of a jam. *New Journal of Physics*, 10:1–8, March 2008.
- M. TREIBER and D. HELBING. Microsimulations of freeway traffic including control measures. *Automatisierungstechnik*, 49:478–484, October 2002.
- M. TREIBER, A. HENNECKE, and D. HELBING. Congested traffic states in empirical observations and microscopic simulations. *Physical Review E*, 62(2):1–47, February 2000.
- U WILENSKY. Netlogo. In *Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling*, Evanston, IL, Northwestern University, 1999. URL Disponível em: <<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>>.
- D. WILKIE, J. SEWALL, and M. LIN. Transforming gis data into functional road models for large-scale traffic simulation. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 16(5):1–14, September/October 2010.
- D. et al. WILKIE. Self-aware traffic route planning. In *Twenty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 2011.
- D.B. et al. WORK. A traffic model for velocity data assimilation. *Applied Mathematics Research eXpress*, 2010(1):1–35, April 2010.
- Q. YANG and H.N. KOUTSOPOULOS. A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 4(3):113–129, June 1996.