



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES**  
**PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES**

**ANDRÉ LUIS MEDEIROS**

**APLICABILIDADE DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA CALIBRAÇÃO DE**  
**REDES VIÁRIAS URBANAS MICROSSIMULADAS**

**FORTALEZA**

**2012**

ANDRÉ LUIS MEDEIROS

APLICABILIDADE DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA CALIBRAÇÃO DE REDES  
VIÁRIAS URBANAS MICROSSIMULADAS

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Engenharia de Transportes.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto

COORIENTADOR: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Fortaleza

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- M438a      Medeiros, André Luis.  
              Aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de redes viárias urbanas  
              microssimuladas / André Luis Medeiros – 2012  
              90 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de  
              Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2012.  
              Área de Concentração: Planejamento de Transporte.  
              Orientação: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto.  
              Coorientação: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro
1. Transportes. 2. Simulação de tráfego. 3. Trânsito - Fluxo. I. Título.

**ANDRÉ LUIS MEDEIROS**

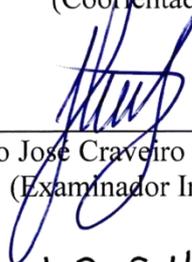
**APLICABILIDADE DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA CALIBRAÇÃO DE  
REDES VIÁRIAS URBANAS MICROSSIMULADAS**

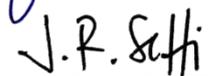
**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO  
CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE  
TRANSPORTES DA UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO CEARÁ COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À  
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA DE TRANSPORTES.**

Aprovada por:

  
\_\_\_\_\_  
Manoel Mendonça de Castro Neto, Ph.D.  
(Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Ph.D.  
(Coorientador)

  
\_\_\_\_\_  
Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D.  
(Examinador Interno)

  
\_\_\_\_\_  
José Reynaldo Setti, Ph.D.  
(Examinador Externo)

FORTALEZA, CE – BRASIL

DEZEMBRO DE 2012

*Dedico este trabalho a dois grandes companheiros, bem mais que amigos, que durante todos os dias dessa jornada estiveram presentes e me alegraram só pelo fato de existirem.*

*Obrigado, Leo e Araújo.*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, Senhor de tudo e de todos;

À Carina Xavier, pelo carinho, dedicação, apoio, paciência e compreensão durante os longos períodos de minha ausência;

Aos professores Dr. Felipe Loureiro e Dr. Manoel Mendonça, por terem me dado a honra de tê-los como orientadores, pela motivação, apoio, confiança e, sobretudo, pela persistência e ensinamentos, os quais foram fundamentais para a conclusão dessa pesquisa;

Ao grande amigo Douglas Afonso Rodrigues, oficial da PMCE, pelo incentivo e apoio nessa etapa tão importante da minha vida;

Ao Sideney Schreiner, pela grande contribuição para o desenvolvimento desse trabalho;

Aos amigos Elievam Bessa e Bruno Carvalho pelas horas desprendidas tirando minhas dúvidas;

Aos amigos André Lopes, Carolina Lopes, Eduardo Aquino, Janailson Sousa e Marília Gouvêia, pelos momentos de aprendizado, descontração e apoio ao longo desses anos;

À Dra. Karla de Abreu, pelas longas e agradáveis conversas, as quais foram fundamentais para o meu crescimento intelectual;

Ao meu primo, Herbert Medeiros, por mim considerado irmão, por sempre estar por perto trazendo alegria e descontração nos momentos mais complicados dessa jornada;

À todas as outras pessoas não citadas, porém não menos importantes, que contribuíram de algum modo para a conclusão dessa dissertação, os meus mais sinceros agradecimentos.

"O degrau de uma escada não serve simplesmente para que alguém permaneça em cima dele, destina-se a sustentar o pé de um homem pelo tempo suficiente para que ele coloque o outro um pouco mais alto."

Thomas Huxley

Resumo da Dissertação submetida ao PETRAN/UFC como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências (M. Sc.) em Engenharia de Transportes.

## APLICABILIDADE DE ALGORITMOS GENÉTICOS PARA CALIBRAÇÃO DE REDES VIÁRIAS URBANAS MICROSSIMULADAS

André Luis Medeiros  
Dezembro/2012

Orientador: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto  
Coorientador: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

A modelagem do tráfego veicular em grandes áreas urbanas é uma ferramenta fundamental na análise do desempenho de novas estratégias e políticas de gerência e controle de tráfego, idealizadas para potencializar a eficiência do sistema de transportes. Com o uso de simuladores de tráfego é possível realizar estudos sobre os impactos de diferentes alternativas de intervenção, tais como a implementação ou duplicação de vias, alterações na circulação viária, entre outras aplicações. Entretanto, os simuladores mais utilizados foram desenvolvidos em outros países e geralmente não representam o comportamento do tráfego das redes viárias urbanas brasileiras, sendo, portanto necessária a calibração dos seus parâmetros. Com a evolução tecnológica dos modelos de microsimulação de tráfego, o processo de calibração tornou-se ainda mais difícil devido ao maior nível de complexidade dos modelos, o que implica no aumento do número de parâmetros a serem calibrados. Diante do exposto e a fim de permitir a utilização de microsimuladores de tráfego na modelagem de malhas viárias urbanas brasileiras, torna-se indispensável o uso de métodos computacionais de otimização que garantam, de forma eficaz, a calibração simultânea de uma grande quantidade de parâmetros. Essa dissertação de mestrado busca verificar a aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de modelos de microsimulação do tráfego veicular em malhas viárias urbanas como as encontradas no cenário nacional. Ao final dessa pesquisa, concluiu-se que o método de calibração utilizado revelou-se eficiente considerando os resultados atingidos no estudo de caso realizado. Além disto, acredita-se que a metodologia aqui proposta juntamente com os valores encontrados para os parâmetros do microsimulador e do algoritmo genético possam ser utilizados em outras malhas viárias urbanas, desde que estas apresentem características semelhantes as da malha viária aqui simulada.

Palavras-chave: Microsimulação de Tráfego, Calibração de Microsimuladores, Algoritmos Genéticos, Modelagem do Tráfego Urbano.

Abstract of thesis submitted to PETRAN/UFC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.) in Transportation Engineering.

APPLICABILITY OF GENETIC ALGORITHMS FOR CALIBRATION OF  
MICROSIMULATED URBAN ROAD NETWORK

André Luis Medeiros  
December/2012

Advisor: Prof. Dr. Manoel Mendonça de Castro Neto  
Co advisor: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro

Traffic simulation modeling of mid-sized and big cities is a fundamental tool to analyze the performance of strategies idealized to maximize efficiency of urban transport systems. Traffic microsimulation models allow for foreseeing the impacts of different alternatives of solution, such as creation or duplication of lanes, reversion of flow direction, and implementation of priority lanes for public transport. However, the main microsimulation software packages available were developed in other countries, what means that they usually do not suit traffic behavior found in Brazilian urban centers, so parameter calibration is necessary to better adjust the models to local reality. Advances in computational capabilities have allowed traffic microsimulation models incorporate greater amount of parameters to be calibrated, so the process of calibration has become relatively more complex. Therefore, the use of computational methods to optimize the parameters' values simultaneously is indispensable. This Master's thesis aims to verify the applicability of genetic algorithms to calibrate microsimulation traffic models in urban Brazilian networks. At the end of this study, it was concluded that the calibration method used proved to be efficient. It is believed that the proposed methodology to calibrate the microsimulation software and the genetic algorithm, as well as the final configuration of the genetic algorithm selected, may be applied to other urban networks, provided that they present similar characteristics to the studied network.

Key Words: traffic microsimulation; traffic microscopic calibration; genetic algorithms; urban traffic modeling.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Representação da aproximação entre veículos no modelo de <i>car-following</i> de WIEDEMANN. ....	17
Figura 2.2 – Parâmetros para mudança de faixa - VISSIM. ....	19
Figura 3.1 - Etapas da metodologia. ....	42
Figura 4.1 - Imagem da malha viária utilizada na pesquisa. ....	50
Figura 4.2 - Imagem da matriz OD utilizada para a pesquisa. ....	53
Figura 4.3 - Modelo de planilha de programação semafórica utilizada no estudo. ....	54
Figura 4.4 - Subáreas de controle semafórico. ....	55
Figura 4.5 - Rede viária codificada no VISSIM. ....	55
Figura 4.6 - Valores dos tempos de viagem observados e simulados (parâmetros <i>default</i> ). ....	58
Figura 4.8 - Variação do número de replicações. ....	61
Figura 4.9 - Variação do número de indivíduos e diversidade. ....	62
Figura 4.10 - Variação do número de indivíduos e taxa de mutação ....	63
Figura 4.11 - Melhor evolução do AG. ....	64
Figura 4.12 - Diferenças dos parâmetros otimizados e <i>default</i> . ....	65
Figura 4.13 - Volumes simulados x observados. ....	68
Figura 4.14 - Tempos de viagem simulados x observados. ....	69

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 2.1 - Aplicação dos modelos de simulação. ....	8
Tabela 2.2 - Trabalhos que realizaram a calibração de parâmetros do VISSIM.....	25
Tabela 2.3 - Glossário de alguns termos utilizados na utilização dos AG's.....	28
Tabela 2.4 - Atributos desejáveis numa medida de desempenho.....	36
Tabela 4.1 - Erro entre os valores observados e simulados para o mínimo valor de MAPE (parâmetros default).57	
Tabela 4.2 - Parâmetros a serem calibrados e seus intervalos de valores.....	59
Tabela 4.3 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e replicações. ....	60
Tabela 4.4 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e diversidade. ....	61
Tabela 4.5 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e taxa de mutação.....	62
Tabela 4.6 - Melhores parâmetros do AG para esta pesquisa. ....	63

## Sumário

CAPÍTULO 1 .....	1
INTRODUÇÃO .....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 PROBLEMA DE PESQUISA .....	2
1.3 QUESTÕES DE PESQUISA .....	2
1.4 OBJETIVOS .....	3
1.4.1 Objetivo Geral.....	3
1.4.2 Objetivos Específicos .....	3
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	4
CAPÍTULO 2.....	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
2.1 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO .....	5
2.2 MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO .....	8
2.2.1 Modelos de <i>Car-Following</i> (Perseguição Veicular) .....	9
2.2.2 Modelos de <i>Lane-Changing</i> (Mudança de Faixa).....	10
2.2.3 Modelos de <i>Gap-Acceptance</i> (Aceitação de Brechas) .....	10
2.3 MICROSIMULADORES DE TRÁFEGO.....	11
2.4 MICROSIMULADOR VISSIM .....	13
2.4.1 <i>Car-Following</i> no VISSIM.....	13
2.4.2 <i>Lane-Changing e Gap-Acceptance</i> no VISSIM .....	18
2.4.3 Alocação do Tráfego e Escolha de Rotas .....	20
2.4.4 Dados de Saída do VISSIM .....	23
2.5 CALIBRAÇÃO DE MICROSIMULADORES.....	23
2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	27
2.6.1 Parâmetros dos Algoritmos Genéticos .....	30
2.7 MEDIDAS DE DESEMPENHO .....	35
2.8 PROCESSO DE VALIDAÇÃO .....	39
CAPÍTULO 3.....	42
METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	42
3.1 FASE DE PRÉ-CALIBRAÇÃO .....	43
3.1.1 Delimitação da área de estudo .....	43
3.1.2 Escolha do simulador .....	44
3.1.3 Escolha das medidas de desempenho .....	44
3.1.4 Coleta de dados .....	44
3.1.5 Codificação da rede de simulação.....	44
3.1.6 Realização das execuções com os parâmetros <i>default</i> .....	45
3.2 FASE DE CALIBRAÇÃO .....	45

3.2.1	Escolha dos parâmetros a serem calibrados.....	45
3.2.2	Configuração do AG .....	46
3.2.3	Execução do AG no processo de calibração .....	48
3.3	FASE DE VALIDAÇÃO .....	48
3.3.1	Validação da rede calibrada .....	48
CAPÍTULO 4.....		50
ESTUDO DE CASO .....		50
4.1	FASE DA PRÉ-CALIBRAÇÃO .....	50
4.1.1	Delimitação da área de estudo .....	50
4.1.2	Seleção do simulador.....	51
4.1.3	Seleção da medida de desempenho .....	51
4.1.4	Coleta dos dados .....	52
4.1.5	Codificação da rede de simulação.....	53
4.1.6	Realização das execuções com os parâmetros <i>default</i> .....	56
4.2	FASE DA CALIBRAÇÃO.....	58
4.2.1	Escolha dos parâmetros do simulador .....	58
4.2.2	Configuração do AG .....	59
4.2.3	Execução do AG .....	64
4.2.4	Análise do melhor indivíduo.....	64
4.3	FASE DA VALIDAÇÃO.....	67
4.3.1	Processo de validação da rede microsimulada .....	67
CAPÍTULO 5.....		71
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....		71
5.1	CONCLUSÕES DA PESQUISA.....	71
5.2	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....		75

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A busca e a análise de possíveis alternativas para solucionar, ou pelo menos minimizar, o problema da baixa fluidez do tráfego nas grandes cidades brasileiras tem se tornado uma grande preocupação para a gestão pública, uma vez que o impacto da saturação nas malhas viárias reflete diretamente, dentre outros fatores, na diminuição da produtividade e na qualidade de vida da população. Várias podem ser as causas dos congestionamentos, destacando-se dentre elas o aumento na utilização dos veículos individuais juntamente com a falta de ampliação da oferta de transporte coletivo de forma compatível à crescente demanda sem a realização de um planejamento viário adequado. Devido a crescente complexidade dos problemas de tráfego aliada a maior disponibilidade de recursos computacionais existentes, modelos de simulação computacional estão sendo cada vez mais utilizados por engenheiros e analistas para auxiliar no planejamento e operação dos sistemas de transporte e tráfego urbanos.

Os simuladores computacionais de tráfego têm como função representar, num nível satisfatório, o comportamento dos veículos e facilitar a análise das várias alternativas destinadas a melhorar o comportamento do fluxo veicular, sem a necessidade de intervenções na malha viária em estudo, evitando transtornos aos usuários e minimizando custos operacionais. Além da fluidez, os pacotes de microsimulação têm sido empregados também em análises de segurança viária (Zhang *et al.*, 2013) e em emissões de poluentes (Song *et al.*, 2012). Conforme defendido por HOURDAKIS *et al.* (2003), para que um simulador possa fornecer resultados confiáveis sobre o sistema de tráfego estudado é fundamental que seus parâmetros estejam devidamente calibrados e validados, e ainda afirmam que a calibração de simuladores de tráfego é frequentemente realizada por tentativa e erro, onde o êxito do processo é dependente da experiência do usuário. Este processo, porém, quando não automatizado, revela-se lento e pouco eficiente.

Com a evolução tecnológica dos modelos de simulação de tráfego, o processo de calibração tornou-se ainda mais difícil devido ao maior nível de complexidade dos modelos, o que implica no aumento do número de parâmetros a serem calibrados. Diante do exposto e a

fim de permitir a utilização de microssimuladores de tráfego na modelagem de malhas viárias urbanas brasileiras, torna-se indispensável o uso de métodos computacionais de otimização que garantam de forma eficaz a calibração de uma maior quantidade de parâmetros.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

Atualmente não existe uma análise da aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de modelos de microssimulação do tráfego veicular em malhas viárias urbanas brasileiras.

## 1.3 QUESTÕES DE PESQUISA

Tendo em vista a necessidade de microssimular uma malha viária urbana brasileira, formulou-se as seguintes questões de pesquisa que serão objetos de estudo nesta dissertação de mestrado:

- 1) quais as dificuldades a serem enfrentadas para a calibração de redes viárias urbanas microssimuladas?
- 2) qual microssimulador, quais medidas de desempenho e quais parâmetros comportamentais dos modelos do microssimulador devem ser selecionados para microssimular redes viárias urbanas brasileiras?
- 3) os valores *default* dos parâmetros de calibração dos microssimuladores de tráfego são adequados para a representação do comportamento do tráfego veicular em malhas viárias urbanas brasileiras?
- 4) qual o efeito do número de replicações da simulação sobre a variabilidade amostral da medida de desempenho?
- 5) como implementar um procedimento de calibração para redes viárias urbanas brasileiras utilizando algoritmos genéticos?
- 6) qual a melhor combinação de valores para os parâmetros de um algoritmo genético a ser utilizado na microssimulação de malhas viárias urbanas brasileiras?

- 7) quais as dificuldades e limitações na utilização de algoritmos genéticos na calibração de redes viárias urbanas microssimuladas?

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 Objetivo Geral**

Esta pesquisa de dissertação tem como objetivo principal verificar a aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de modelos de microssimulação do tráfego veicular em malhas viárias urbanas brasileiras.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

Com o intuito de alcançar o objetivo geral desta dissertação, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- 1) investigar os principais procedimentos utilizados para calibração de redes viárias urbanas microssimuladas;
- 2) selecionar um microssimulador do tráfego veicular urbano, assim como medidas de desempenho e parâmetros comportamentais dos modelos microscópicos do simulador a serem calibrados, adequados para representar a realidade das malhas viárias urbanas brasileiras;
- 3) avaliar a adequabilidade dos valores *default* dos parâmetros de calibração do simulador na representação do comportamento do tráfego veicular em malhas viárias urbanas brasileiras;
- 4) analisar o efeito do número de replicações da simulação sobre a variabilidade amostral da medida de desempenho;
- 5) realizar uma análise de sensibilidade dos valores dos parâmetros do AG na calibração de redes microssimuladas;
- 6) calibrar e validar uma rede piloto como estudo de caso de uma malha viária urbana brasileira;

- 7) identificar possíveis limitações teóricas e dificuldades práticas da utilização de AG's na calibração de redes viárias urbanas microsimuladas.

## **1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO**

Esta dissertação de mestrado está organizada em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo, foi realizada uma contextualização do problema abordado, seguida pela explanação das questões e objetivos (geral e específicos) da pesquisa.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica, em que foi realizada uma busca por artigos e trabalhos científicos que tratassem da calibração e validação de microsimuladores. Esse capítulo inicia com um breve histórico sobre simulação do tráfego; logo após são descritos os tipos de simuladores, seu nível de agregação, tipo de funcionamento, bem como suas diversas aplicações. Ainda nesse capítulo, descreve-se detalhadamente as principais características do microsimulador VISSIM (funcionamento, parâmetros, dados de entrada/saída e limitações) que foi o modelo utilizado neste trabalho. Ao final, apresenta-se uma revisão geral sobre algoritmos genéticos (AG), abordando sua estrutura básica, os operadores genéticos, os parâmetros de controle e algumas possíveis aplicações deste método de otimização escolhido para a calibração dos parâmetros da rede microsimulada.

O terceiro capítulo destina-se a esclarecer todas as etapas adotadas nesta pesquisa para o estudo de caso da avaliação da aplicabilidade de algoritmo genético como método de otimização na calibração de uma rede viária urbana microsimulada. Esse capítulo inicia com a apresentação de um fluxograma do processo e logo após é feita uma descrição de cada passo seguido, desde a delimitação da área de estudo até o processo de validação.

O quarto capítulo trata de um estudo de caso no qual foi utilizado algoritmos genéticos na calibração de uma rede viária urbana brasileira utilizando o microsimulador VISSIM. Este capítulo descreve com detalhes a realização de cada etapa do método adotado para a calibração, apresenta uma análise da busca pela melhor combinação dos valores para os parâmetros e operadores genéticos do algoritmo usado nesta pesquisa e finaliza apresentando o processo de validação da rede microsimulada.

Por último, no quinto capítulo, são relatadas as conclusões, limitações do estudo, recomendações para a comunidade técnica e feitas sugestões para possíveis trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Segundo PORTUGAL (2005), o propósito da simulação é representar ou modelar o comportamento próprio e as interações dos elementos de um sistema para permitir uma avaliação prévia do seu desempenho. Sendo mais específico no campo da engenharia de tráfego, MAY (1990) declara que a simulação do tráfego veicular é uma técnica numérica para a representação computacional de sistemas viários e tem como finalidade replicar a sequência de eventos hipotéticos do sistema estudado ao longo do tempo, tratando as entidades que percorrem o modelo (veículos) de forma agregada ou individualizada. BARCELÓ (2010) esclarece que a simulação é um instrumento que permite experimentos controlados abrangendo as diferentes variáveis que descrevem o desempenho do tráfego, nos diversos níveis de agregação.

Modelos de simulação de tráfego surgiram na década de 60, na Inglaterra, e desde então estes modelos vêm sendo aperfeiçoados, para simular de forma mais eficiente o sistema real. Os modelos computacionais de simulação de tráfego vêm, portanto, sendo cada vez mais empregados no planejamento e operação do sistema de transportes, permitindo análises mais robustas de sistemas com grande complexidade (HOURDAKIS et al., 2003). Percebe-se também que a utilização das técnicas de simulação tem possibilitado o desenvolvimento de novas tecnologias voltadas para a otimização do desempenho operacional dos sistemas de transportes (CUNTO e LOUREIRO, 2011).

A utilização de simuladores de tráfego permite, através dos resultados das simulações, propor mudanças que resultem em melhorias para o sistema em estudo. Essas mudanças são feitas no próprio software e os resultados gerados são analisados com o intuito de decidir se as mudanças são viáveis ou não, tornando o processo de tomada de decisão muito mais sólido, pois é possível avaliar um conjunto de alternativas sem haver a necessidade de intervir diretamente no tráfego, além de possibilitar o estudo de situações ainda inexistentes (KIM e RILETT, 2001). MAY (1990) também expõe vantagens na utilização dessa técnica, tais como: permitir avaliações de novas condições no cenário estudado, possibilitar análises e intervenções num cenário computacional ao invés da tentativa

e erro no ambiente real, possibilidade de analisar em tempo real, estendido ou até mesmo, em tempo reduzido o sistema em estudo. Outras vantagens também são percebidas, tais como a redução de custos financeiros e do risco de acidentes, pois é muito menos oneroso realizar alterações em ambientes de simulação do que num sistema real, bem como inexistência a possibilidade de acidentes num ambiente de simulação computacional.

Apesar dos simuladores de tráfego possuírem grandes vantagens no planejamento e gestão de sistemas de transportes, a sua aplicação, na maioria das vezes, é complexa e exige muitos recursos. A dificuldade na interpretação e análise dos resultados, a imprecisão e a dificuldade de calibração e validação são vistas como desvantagens da simulação. Outras desvantagens na utilização desse ferramental também são apresentadas por MAY (1990), como por exemplo: a quantidade de tempo e recursos despendidos durante a simulação, a grande quantidade de dados de entrada necessários e conseqüentemente a dificuldade na coleta destes, a necessidade dos processos de calibração e validação serem bem realizados sob pena de tornar o modelo inútil e a necessidade de grande conhecimento sobre os dados de saída, das limitações do modelo, bem como, do sistema analisado.

MAIA (2007) afirma que o grande diferencial dos modelos de simulação de tráfego é a capacidade de incorporarem a variabilidade espaço-temporal dos elementos que compõem o sistema simulado, dando-lhes um maior poder de representação. Ainda salienta que esses programas computacionais têm sido utilizados na formulação e validação de expressões analíticas aproximadas, bem como na representação estocástica de situações complexas.

O nível de agregação com que os simuladores representam o tráfego constitui uma importante propriedade dos modelos. Sendo assim, os simuladores são classificados em três tipos distintos através do nível de detalhamento da representação do tráfego na rede, são eles: modelos macroscópicos, modelos mesoscópicos e modelos microscópicos.

Os modelos macroscópicos simulam o tráfego veicular em uma rede com base nas relações entre as variáveis agregadas do fluxo, velocidade média e densidade. Nestes modelos apenas o comportamento da corrente veicular ao se deslocar pelas vias da rede é considerado. Ainda que estes modelos possam ser utilizados para avaliação operacional do tráfego, a incapacidade de diferenciar faixas de tráfego e de modelar a interação entre veículos individualmente, muitas vezes forçam os engenheiros ou analistas a utilizarem modelos com

maior capacidade de resolução. Contudo, PORTUGAL (2005) apresenta como vantagens no uso dos macrossimuladores a menor quantidade de parâmetros a serem calibrados e, do ponto de vista computacional, a velocidade na execução das simulações. Entre os simuladores macroscópicos estão o EMME 2, TRANSCAD e o AIMSUN.

Os modelos microscópicos são caracterizados pelo grande nível de detalhamento do tráfego e conseqüentemente, por exigir uma grande quantidade de dados de entrada. São os modelos mais avançados, principalmente devido à sua capacidade de simular um sistema de tráfego veículo a veículo, posição, velocidade, aceleração e outras variáveis. Estes modelos calculam as trajetórias individuais dos veículos baseando-se em algoritmos de *car-following*, *lane-change* e *gap-acceptance*. Estes modelos oferecem aos usuários a possibilidade de especificação dos valores de vários parâmetros, como por exemplo, o *headway* mínimo, a distância desejada de *following*, os parâmetros de mudança de faixa e de controle de aceleração, buscando replicar satisfatoriamente as condições do campo. Modelos como o INTEGRATION, PARAMICS, AIMSUN, VISSIM, TRANSMODELER e o CORSIM são exemplos de microssimuladores.

Os modelos mesoscópicos apresentam características mistas, constituindo um nível intermediário de agregação. Simuladores como o AIMSUN, possuem a capacidade de considerar veículos individualmente, mas modelagem do tráfego é baseada em características agregadas da corrente de tráfego, como a velocidade média, fluxo e densidade. Estes modelos podem ser usados, por exemplo, na avaliação do tempo de viagem individual dos veículos com base nas condições predominantes da velocidade média na rede. O SATURN, TRANSYT, SCOOT, AIMSUN e TRANSCAD são exemplos de simuladores mesoscópicos.

Na literatura consta uma vasta gama de aplicações de simuladores de tráfego veicular. Esses modelos são utilizados na avaliação de alternativas no gerenciamento de tráfego; no planejamento, projeto e teste de novas instalações de transportes; como suporte a outras ferramentas de controle e otimização do tráfego; no treinamento e aperfeiçoamento de técnicos na área de tráfego; entre outras aplicações. Os diferentes campos de aplicação dos modelos exigem ferramentas com objetivos distintos. Conseqüentemente, modelos com objetivos distintos, apresentam hipóteses e propriedades diferenciadas. A Tabela 2.1 apresenta algumas aplicações possíveis para cada tipo de simulador.

Tabela 2.1 - Aplicação dos modelos de simulação.

MODELOS	APLICAÇÃO
Macroscópicos	Planejamentos de intervenções estratégicas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
Mesoscópicos	Análises de intervenções táticas
	Simulação de médias/grandes áreas
	Implementação de novas vias
	Duplicação de vias
	Definição de rotas de veículos
	Verificação das mudanças de rotas de veículos por causa de estímulos
Microscópicos	Análises de intervenções operacionais
	Simulação de pequenas/médias áreas
	Análises de esquemas alternativos de controle de tráfego
	Alteração na operação semafórica
	Entrada e saída de rampas
	Definição de rotas de veículos
	Análise de esquemas de operação de tráfego em área
	Verificação das mudanças de rotas de veículos por causa de estímulos

Fonte: Maia (2007).

A decisão por qual tipo de modelo utilizar dependerá dos objetivos que se procura atingir. Normalmente, a escolha por utilizar um modelo que não seja o modelo microscópico provoca a perda de diversos padrões de comportamento dos condutores, um aspecto muito importante para a análise de malhas viárias urbanas.

## 2.2 MODELOS MICROSCÓPICOS DE TRÁFEGO

Os modelos de simulação microscópica de tráfego têm desempenhado um papel importante na avaliação das práticas de planejamento e engenharia de transporte nas últimas décadas, particularmente nos casos cuja implementação em campo é difícil ou onerosa (PARK e QI, 2005).

Conforme MACHADO (2004), os modelos microscópicos são compostos por uma descrição precisa da geometria da rede, semáforos, sensores de tráfego, painéis de mensagens variáveis e por uma modelagem detalhada do comportamento do tráfego que reproduz a dinâmica de cada veículo, distinguindo-os em diferentes tipos, levando em conta o

comportamento do veículo e do condutor. Isto faz com que os microssimuladores sejam os mais precisos na representação do sistema de tráfego, permitindo ainda desenvolver vários cenários de simulação em que é possível descrever condições de controle e gestão de tráfego que posteriormente podem ser testadas no campo.

Nos microssimuladores, a simulação do comportamento do tráfego é feita veículo a veículo durante todo o tempo que esse veículo permanece na rede. Para isso, utiliza-se de submodelos que descrevem os comportamentos de *car-following* (perseguição veicular), *lane-changing* (mudança de faixa) e *gap-acceptance* (aceitação de brechas). Assim, torna-se possível reproduzir o comportamento dos veículos simulando os seus deslocamentos desde uma origem até um destino dentro da rede, permitindo analisar as reações do sistema. Como um modelo é uma representação do que existe a nossa volta ou do comportamento de uma determinada entidade, é necessário que a simulação de uma malha viária urbana represente de forma satisfatória o que acontece em campo, dessa forma, os modelos microscópicos de simulação, por permitirem um nível mais elevado de detalhamento, exigem um maior número de *inputs* em relação aos outros modelos, um maior aparato computacional e demandam mais tempo para a realização da simulação.

### **2.2.1 Modelos de *Car-Following* (Perseguição Veicular)**

Um simulador de tráfego é constituído por vários submodelos, cada um sendo responsável por uma tarefa específica na simulação. Esses submodelos incluem, entre outros, os de *car-following*. Estes modelos surgiram no final da década de 50 e são responsáveis por representar um dos comportamentos mais importantes na modelagem microscópica do tráfego. Os microssimuladores utilizam esses algoritmos para representar as interações longitudinais entre dois ou mais veículos ao longo da rede. Ou seja, buscam modelar a forma como cada unidade veículo/condutor reage a unidade imediatamente à sua frente.

Os modelos de *car-following* regem a movimentação dos veículos através de vários parâmetros predefinidos, determinando a velocidade e a aceleração em função da distância entre o veículo seguidor e o líder. Essa interação segue um processo de estímulos e respostas que calcula a aceleração do veículo seguidor através de algumas variáveis relativas ao veículo líder, tais como: velocidade do veículo líder, distância ao veículo líder, aceleração e também de outros parâmetros relativos ao veículo seguidor, como por exemplo, o tempo de

reação. Existem atualmente modelos de *car-following* que também consideram o tráfego nas faixas adjacentes, como o modelo atualmente disponível pelo software AIMSUN.

### **2.2.2 Modelos de *Lane-Changing* (Mudança de Faixa)**

O modelos de *lane-changing* são responsáveis por modelar o comportamento dos veículos durante as mudanças de faixa. Esses modelos descrevem os movimentos transversais dos veículos ao longo da via e são acompanhados pelas mudanças de faixas. Normalmente, a mudança de faixa acontece quando um condutor deseja realizar uma conversão adiante ou quando as condições na faixa em que ele está trafegando não o agradam, como por exemplo, quando um veículo a sua frente trafega numa velocidade mais lenta que a sua. No entanto, conforme afirma LIU (1994), quando um veículo deseja executar uma mudança de faixa, ele precisa conhecer a velocidade e a posição dos veículos vizinhos. Vale salientar que a mudança de faixa só acontece se existir espaço suficiente na faixa de destino, para que o veículo possa realizar a mudança com segurança.

As mudanças de faixa podem ser classificadas em dois modos distintos:

- Mudança de faixa obrigatória – nesse caso, a realização da mudança não é uma opção do condutor, pois algo o obriga a realizar tal mudança, como por exemplo, a existência de um acidente na via atual;
- Mudança de faixa livre ou arbitrária – aqui a mudança de faixa acontece quando o condutor não está satisfeito com as condições de tráfego na faixa em que ele se encontra, fazendo com que ele procure condições melhores em outras faixas, como exemplo, tem-se o caso em que veículos mais lentos trafegam a sua frente.

Como já explicitado, um ponto a ser levado em consideração nos movimentos de mudança de faixa é o espaço disponível entre os veículos envolvidos de modo a permitir que essas manobras sejam realizadas com segurança. Existem modelos específicos que tratam desses espaços disponíveis, chamados de modelos de aceitação de brechas.

### **2.2.3 Modelos de *Gap-Acceptance* (Aceitação de Brechas)**

Os modelos de *gap-acceptance* possuem uma grande importância na modelagem de malhas viárias urbanas, pois são responsáveis pelo comportamento dos condutores em

interseções não semaforizadas. Esses modelos regem a aceitação de brechas pelos condutores que atravessam ou se inserem na via principal.

Para a verificação da possibilidade de realizar uma mudança de faixa, os modelos de *gap-acceptance*, levam em consideração a posição e as velocidades dos veículos envolvidos, calculando se o espaço entre eles permite ou não a execução da mudança. Basicamente, o que determina se vai ocorrer ou não a mudança de faixa, é a comparação entre uma distância mínima aceitável inicialmente definida com o espaço disponível existente. Caso a distância mínima predefinida pelo usuário seja menor que distância existente entre os veículos, ocorrerá a mudança de faixa, do contrário a mudança não será realizada.

### **2.3 MICROSSIMULADORES DE TRÁFEGO**

A utilização de microsimuladores em malhas viárias urbanas têm-se tornado uma ferramenta indispensável na resolução de complexos problemas de tráfego em áreas urbanas. Diante da importância dessas ferramentas, atualmente estão disponíveis no mercado vários microsimuladores que possuem a capacidade de modelar situações complexas do comportamento do tráfego em redes viárias, tornando necessário utilizar algum critério para uma correta escolha do microsimulador.

O HIGHWAY CAPACITY MANUAL (TRB, 2000), relata alguns critérios para a realização da escolha de simuladores de tráfego, tais como:

- Capacidade do aplicativo – Deve-se considerar as limitações do simulador em modelar a rede, a capacidade de representação dos elementos da rede, bem como as saídas do modelo;
- Disponibilidade e quantidade de dados – Atentar para quais dados de entrada são requeridos e quão fácil é a obtenção destes dados;
- Facilidade de uso – Este é um pré-requisito para aplicativos computacionais de qualquer natureza, sendo neste caso, referente à facilidade para a codificação da rede, alteração de elementos da rede, o manuseio dos dados e etc.;
- Recursos necessários – Necessidade de bases de dados georreferenciadas, necessidade de métodos de otimização; disponibilidade de consultorias na utilização do simulador, custos financeiros, facilidade de aquisição e etc.;

- Histórico de implantações – Considerando principalmente os procedimentos de calibração e validação já realizados.

O manual TRAFFIC ANALYSIS TOOLBOX (FHWA, 2004) sugere uma metodologia para a correta escolha do simulador de tráfego levando em consideração o tipo de estudo a ser realizado. Essa escolha é realizada, seguindo um primeiro passo que consiste em definir o contexto do estudo e após essa definição, avalia-se minuciosamente outros critérios conforme abaixo especificados:

- Capacidade de analisar a área a ser estudada, seja uma interseção isolada ou uma rede viária;
- Possibilidade de modelar diversos tipos de facilidades de transporte, tais como vias expressas, faixas para veículos de alta ocupação, rampas, vias arteriais;
- Aptidão para analisar vários modos de transporte, como veículos de baixa e alta ocupação, ônibus, trem, caminhão, bicicletas e tráfego de pedestres;
- Permitir a análise de diversas aplicações e estratégias de gestão de tráfego, tais como operação em rampas de acesso, coordenação semafórica, gerenciamento de incidentes;
- Capacidade de simular desvios de rota, escolha de horário de saída, mudança de modo de transporte, escolha do destino e demanda induzida e reprimida;
- Capacidade de produzir medidas de desempenho, como por exemplo, número de colisões, volumes, tempo de viagem, velocidade, veículos por hora de viagem, economia de custos, emissões de poluentes, consumo de combustível, ruído, etc;
- O custo-benefício do simulador para a realização do estudo, considerando o valor financeiro do *software*, o nível de conhecimento exigido para lidar com a ferramenta, a facilidade na sua utilização, os requisitos computacionais, os dados de entrada, animações, etc.

Entre os microssimuladores mais relatados ultimamente em trabalhos científicos, pode-se destacar o CORSIM, o PARAMICS, o INTEGRATION, AIMSUN e o VISSIM.

Apesar dos simuladores citados possuírem boas qualidades e serem capazes de simular malhas viárias urbanas, aqui será dado ênfase somente ao VISSIM por ser o simulador utilizado neste trabalho. Os motivos da escolha por esse simulador serão melhor explanados no quarto capítulo.

## 2.4 MICROSSIMULADOR VISSIM

VISSIM é a sigla do termo alemão Verkehr In Städten SIMulation que significa simulação de tráfego em cidades. Este software, desenvolvido e comercializado pela empresa alemã PTV AG, consiste num simulador capaz de modelar o tráfego de automóveis e pedestres, bem como de transportes públicos, possibilitando a análise e otimização do funcionamento de interseções e redes viárias (PTV, 2010).

O VISSIM é um microsimulador de tráfego, com algoritmos de representação do tráfego baseados nos trabalhos de WIEDEMANN (1974) e WIEDEMANN (1991), os quais combinam um modelo de percepção de motoristas com modelos de desempenho de veículos. O algoritmo utilizado para movimentos longitudinais dos veículos (*car-following*) apresenta características psicofísicas, enquanto os movimentos transversais (*lane-changing*) são determinados por um algoritmo baseado em regras, conforme apresentado nos trabalhos de FELLENDORF e VORTISCH (2001) e de OLIVEIRA e CYBIS (2008).

De acordo com OLIVEIRA e CYBIS (2008), entre as qualidades do modelo VISSIM apontadas por alguns autores estão: (i) superioridade para a representação dos movimentos de veículos pelo algoritmo de *car-following* psicofísico, (ii) praticidade no desenvolvimento de redes a modelar, (iii) flexibilidade na definição dos parâmetros de troca de faixas e *following* por área ou *link* de tráfego e (iv) praticidade e flexibilidade na forma de apresentação de relatórios com os resultados das simulações.

### 2.4.1 *Car-Following* no VISSIM

O VISSIM permite ao usuário optar por dois modelos de *car-following*, que são modelos psicofísicos: o modelo WIEDEMANN 74 ou o modelo WIEDEMANN 99, este último sendo um modelo mais abrangente e conseqüentemente, contendo um número maior de parâmetros.

PTV (2010) afirma que o modelo WIEDEMANN 74 é o mais indicado para representar o tráfego urbano, situação na qual os veículos trafegam com velocidades mais baixas, os *headways* são pequenos, os tempos de reação dos condutores são menores e as paradas e arrancadas são frequentes. Nesse modelo é necessário que o usuário calibre três parâmetros: a distância média desejada entre dois veículos parados, a distância de segurança desejada e um multiplicador da distância desejada de segurança. Já o modelo WIEDEMANN 99 é adequado para o tráfego de veículos em trechos rodoviários interurbanos, podendo ser calibrado através de dez parâmetros comportamentais, que buscam representar diferentes modos de condução, conforme especificados abaixo:

- CC0 (*Standstill distance*) - define a distância desejada entre veículos parados;
- CC1 (*Headway time*) - é o espaço de tempo (em segundos) que o motorista deseja manter do veículo líder. Quanto maior o valor, mais prudente é o condutor;
- CC2 (*'Following' variation*) - limita a oscilação longitudinal, ou seja, determina o maior valor do espaçamento acima da distância de segurança desejada quando um veículo se aproxima do carro à frente;
- CC3 (*Threshold for entering 'Following'*) - controla o início do processo de desaceleração, ou seja, o momento que o condutor reconhece um veículo mais lento à frente. Em outras palavras, ele define quantos segundos antes de atingir a distância de segurança o condutor começa a desacelerar;
- CC4 e CC5 (*'Following' thresholds*) - controla as diferenças de velocidade durante o estado de *following*. Menores valores resultam em uma reação mais sensível dos motoristas, para acelerações ou desacelerações do carro à frente. O CC4 é usado para as diferenças de velocidade negativas e o CC5 para positivas;
- CC6 (*Speed dependency of oscillation*) - influência da distância na velocidade de oscilação quando no processo de *following*. Se definido como zero, as oscilações de velocidade independem da distância do veículo à frente. Valores maiores levam a uma maior oscilação da velocidade com uma distância cada vez maior;

- CC7 (*Oscillation acceleration*) - é aceleração real durante o processo de oscilação;
- CC8 (*Standstill acceleration*) - é a aceleração desejada que se inicia a partir do repouso (limitada pela aceleração máxima definida pelas curvas de aceleração);
- CC9 (*Acceleration at 80 km/h*) - é a aceleração desejada a 80 km/h (limitada pela aceleração máxima definida pelas curvas de aceleração).

Conforme PTV (2010), a idéia básica do modelo de WIEDEMANN 99, versão atualizada do algoritmo de WIEDEMANN 91, é assumir que motoristas podem estar em um dos quatro estágios de formas de condução de veículos a seguir:

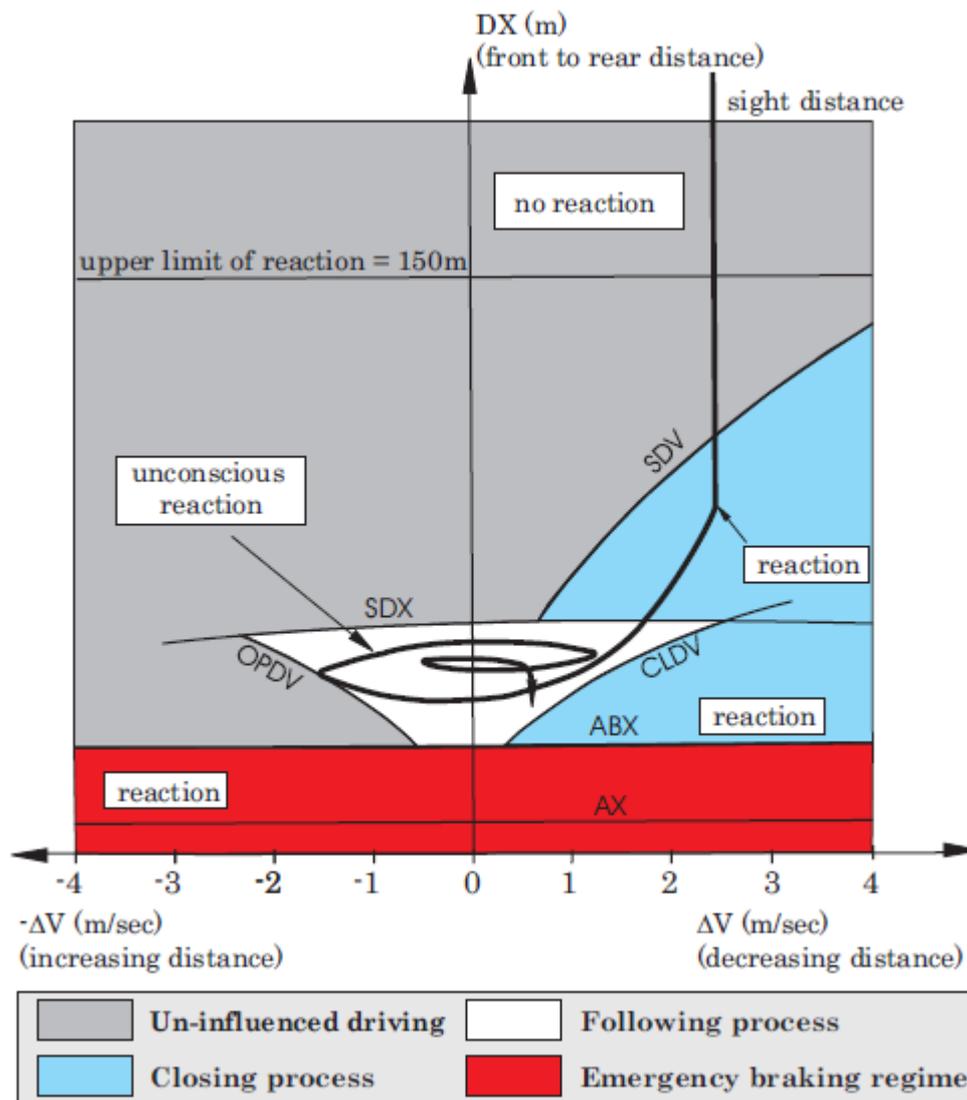
- Condução Livre - Sem influências de veículos a sua frente. Nesta forma de condução, o motorista busca atingir e manter sua velocidade desejada. Na realidade, a velocidade na condução livre não se mantém constante, variando em torno da velocidade desejada devido ao controle imperfeito do pedal do acelerador;
- Condução de Aproximação - Corresponde ao processo de adaptação da velocidade de motoristas as menores velocidades impostas por veículos mais lentos à sua frente, de forma a atingir uma distância de segurança desejada;
- Condução de Seguidor - O motorista segue o veículo a sua frente sem consciência de aceleração ou desaceleração, buscando manter relativamente constante uma distância por ele considerada segura. Contudo, devido a imperfeições no controle do pedal do acelerador e em estimativas de posicionamento, a diferença de velocidades oscila em torno de zero;
- Condução de Frenagem - Ocorre se há imposição de taxas de desaceleração médias ou altas, resultando em distâncias entre veículos abaixo da distância considerada segura pelo condutor (veículo seguidor). Isto pode acontecer quando o veículo líder diminui sua velocidade abruptamente, ou quando outro veículo realiza uma troca de faixa, ficando a frente do veículo seguidor, diminuindo assim a distância de segurança desejada.

Para cada modo, a aceleração é descrita como um resultado da velocidade, das diferenças de velocidade, das distâncias e das características individuais dos condutores e dos veículos. O motorista muda de um modo para outro, tão logo atinja um certo limiar de percepção que pode ser expresso como uma combinação da diferença de velocidade e distância (FELLENDORF e VORTISCH, 2001).

Segundo PTV (2010), o conceito básico deste modelo é que o condutor de um veículo em movimento começa a desacelerar quando ele atinge o seu limiar de percepção individual em relação a um veículo mais lento em movimento a sua frente (veículo líder). Como ele não pode determinar exatamente a velocidade do líder, sua velocidade cairá abaixo da velocidade desse veículo, até que ele começa a acelerar um pouco mais depois de atingir outro limiar de percepção. Isso resulta em um processo iterativo de aceleração e desaceleração.

Conforme WIEDEMANN E REITER (1992), estes estágios se distinguem por seis curvas limítrofes de percepção, obtidas por meio de expressões matemáticas que consideram explicitamente erros de julgamento de espaçamento, velocidade e taxas de aceleração e desaceleração para o mesmo condutor no decorrer do tempo, bem como entre diferentes condutores, conforme mostrado na Figura 2.1.

Figura 2.1- Representação da aproximação entre veículos no modelo de *car-following* de WIEDEMANN.



Fonte: Cunto (2008).

As percepções particulares de motoristas e o comportamento individual de risco são modelados pela adição de valores aleatórios em cada um dos parâmetros apresentados na Figura 2.1, onde:

- AX – distância desejada entre dois veículos sucessivos em uma fila parada;
- ABX – distância mínima desejada de *'following'*, a qual é uma função de AX, de uma distância de segurança e da velocidade;
- SDV – ponto sobre o qual o condutor passa a perceber a aproximação de um veículo mais lento a sua frente. O SDV é alterado na medida em que mudam as diferenças de velocidades entre veículos;

- CLDV – ponto sobre o qual o condutor do veículo seguidor percebe a diminuição do espaço entre seu veículo e o veículo a sua frente, passando a desacelerar;
- OPDV – ponto sobre o qual o condutor do veículo seguidor percebe o aumento do espaço entre seu veículo e o veículo a sua frente, passando a acelerar novamente;
- SDX – fronteira de percepção sobre a qual é modelada a máxima distância de ‘following’, que representa em torno de 1,5 a 2,5 vezes ABX.

#### **2.4.2 Lane-Changing e Gap-Acceptance no VISSIM**

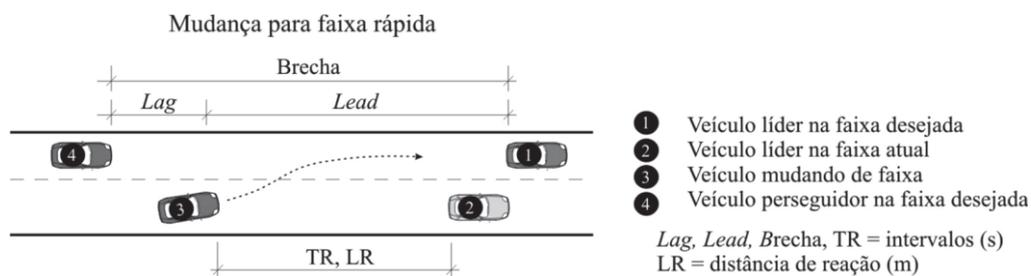
De acordo com PTV (2010), o VISSIM possui dois tipos de comportamento em relação às mudanças de faixas:

- Mudança de faixa necessária: Neste caso, os parâmetros do comportamento de condução devem conter uma (des)aceleração máxima aceitável, tanto para o veículo que efetua a mudança quanto para o que circula na faixa desejada. Um caso característico deste tipo de mudança é quando o veículo que circula na faixa esquerda de uma via deseja pegar uma saída à direita, sendo assim obrigado a mudar para a faixa da direita;
- Mudança de faixa livre: Neste caso, o VISSIM verifica uma distância de segurança desejada em relação ao veículo que viaja na faixa para a qual o condutor pretende mudar. Essa distância de segurança depende, tanto da velocidade do veículo que trafega na faixa desejada quanto do veículo que deseja efetuar a mudança de faixa. O VISSIM também possui outros parâmetros possíveis de serem alterados, como por exemplo, o tempo máximo de espera numa parada de emergência até o fluxo estar livre, como também, a distância mínima disponível em relação ao veículo líder, para efetuar uma mudança de faixa.

Nos dois casos citados, quando um condutor tenta mudar de faixa, o primeiro passo é encontrar um espaço de tempo adequado, chamado de tempo de *headway*, no fluxo de destino. A magnitude desse espaço depende da velocidade de ambos os condutores envolvidos

na mudança de faixa e dos veículos próximos que seguem na faixa desejada. Esse processo é mostrado na Figura 2.2.

Figura 2.2 – Parâmetros para mudança de faixa - VISSIM.



Fonte: CUNTO e LOUREIRO (2011).

Abaixo são descritos alguns parâmetros que influenciam o processo de mudança de faixas no VISSIM:

- *Min. Headway (MH)* – define a distância mínima ao veículo da frente na qual se possa realizar a mudança de faixa estando parado;
- *Safety distance reduction fator (SD)* – esse fator é considerado durante qualquer mudança de faixa. Ele afeta diretamente na decisão de realizar ou não a mudança de faixa em relação à distância a que se encontra do veículo que está na faixa desejada. Durante a mudança de faixa, a distância de segurança diminui, sendo o produto da distância de segurança multiplicada pelo fator de redução. Um fator de redução igual 0,6 (*default*) reduz a distância de segurança em 40%, voltando ao valor normal após a realização da mudança desejada.
- *Maximum deceleration for cooperative braking (MD)* – define se o veículo que está na faixa desejada inicia uma frenagem cooperativa de modo a permitir que o veículo líder consiga realizar a mudança para a sua faixa. Um valor mais elevado desse parâmetro, aumenta a probabilidade de mudança de faixa. Para dar início a realização da mudança de faixa, o veículo líder ainda levará em consideração o fator de redução da distância de segurança, bem como, os parâmetros de *car-following*.

De acordo com CUNTO e LOUREIRO (2011), uma vez que existe a motivação para a mudança de faixa, o processo passa a ser modelado de maneira similar aos algoritmos

de aceitação de brechas que garantem que a mudança de faixa seja realizada com segurança. O modelo de aceitação de brechas se baseia na probabilidade de um condutor encontrar um espaço de tempo suficiente, em algum momento, que permita o cruzamento ou a entrada na corrente de tráfego da via prioritária, ou ainda realizar a mudança de faixa na via principal. A literatura mostra que o valor da brecha pode diminuir com o aumento do tempo de espera.

Conforme CUNTO e LOUREIRO (2011), o processo de aceitação de brechas no VISSIM para interseções não semaforizadas pode ser modelado por meio do estabelecimento de regras de prioridade de passagem ou utilizando o conceito de áreas de conflitos. Para realizar a modelagem utilizando as regras de prioridade, deve-se definir os movimentos com preferência de passagem, colocando faixas de retenção virtuais na via secundária e definindo uma brecha mínima para permitir a entrada na corrente de tráfego. Caso seja escolhido modelar utilizando as áreas de conflito, o VISSIM detecta essas áreas com base na geometria da via. Na simulação, o condutor na via secundária avalia a brecha disponível e a situação além da área de conflito para então decidir pela aceitação ou não da brecha.

### **2.4.3 Alocação do Tráfego e Escolha de Rotas**

FELLENDORF E VORTISCH (2010) apresentam três formas distintas de alocação do tráfego no VISSIM. O tráfego pode ser distribuído em rotas fixas, ou seja, rotas pré-definidas pelo usuário nas quais os condutores estarão cientes das conversões à frente, desde o início até o final da rota. Nesse modo, pode-se especificar rotas parciais distribuindo os veículos em subconjuntos de rotas alternativas. Esse tipo de rota pode ser atribuída a todos os veículos da rede ou apenas a um determinado conjunto de veículos. Isso tem grande importância quando se deseja modelar grupos de condutores de uma forma mais realista, como por exemplo, os condutores que já estão familiarizados com a área e que se mantêm na faixa mais apropriada para as conversões necessárias e os que seguem a sinalização de trânsito, decidindo as conversões tardiamente por não ter um prévio conhecimento da rede.

Uma outra opção para a alocação do tráfego no VISSIM é a utilização de programação em linguagem VAP, a mesma linguagem de programação usada para o controle semafórico nesse *software*. Nesse caso o roteamento é dinâmico, sendo necessária a criação de uma lógica que descreva as condições e decisões de redirecionamento do tráfego. Esse

recurso pode ser utilizado tanto para pequenas redes como para redes de grande porte. Essa opção também pode ser aplicada apenas a um subconjunto de veículos.

Existe também a possibilidade de distribuir o tráfego utilizando o que o *software* denomina de alocação dinâmica. Para esse processo, o VISSIM utiliza a ideia de simulação iterativa, ou seja, a rede modelada é simulada várias vezes até que seja alcançada uma situação estável na qual os volumes e os tempos de viagem nos *links* da rede não se alteram significativamente de uma iteração para outra. Os critérios pra esta situação de convergência devem ser definidos pelo usuário. O procedimento visa o equilíbrio estocástico do usuário (FELLENDORF E VORTISCH, 2010). Neste processo de alocação, a demanda de viagens é especificada utilizando uma matriz O/D, onde na codificação da rede são especificadas zonas e nestas, são criados elementos chamados *parking lots* (estacionamentos) que funcionam como locais onde os veículos entram e saem da rede, ou seja, as viagens iniciam e terminam nesses estacionamentos.

Na alocação do tráfego, os tempos de viagem são computados para cada *link* durante as iterações para que possam ser utilizados na decisão de escolha de rotas. Essa decisão é baseada numa função de custo geral, a qual é uma combinação linear do tempo de viagem, da distância percorrida e dos custos financeiros, caso esses custos sejam especificados, como por exemplo, pedágios. Os pesos de cada componente dessa função podem ser definidos pelo usuário. Como anteriormente falado, os custos são obtidos para cada *link*, sendo assim, a função de custo geral para uma determinada rota é calculada como o somatório dos custos de todos os *links* que compõem essa rota.

De acordo com PTV (2010), o VISSIM busca a melhor rota entre cada par O/D a cada iteração, até que os critérios de convergência adotados sejam alcançados. Como os tempos de viagem e as condições do tráfego mudam de uma iteração para outra, após várias iterações, diferentes melhores rotas são encontradas e armazenadas num banco de dados crescente do *software*, para que sejam utilizadas nas iterações posteriores. Vale salientar que o tempo de viagem é resultado da simulação, enquanto que a distância e os custos financeiros são dados fornecidos pelo usuário. Logo, durante a primeira iteração não se têm nenhuma informação do tempo de viagem, sendo utilizado somente a distância e os custos financeiros para computar o custo geral da rota. Caso algum *link* não tenha sido percorrido por algum veículo na primeira iteração, o tempo de viagem desse *link* será de apenas 0,1 segundo na

próxima iteração, visando atrair viagens para esses *links* não percorridos nas próximas iterações e assim, avaliar a potencialidade de novas rotas.

Normalmente existe mais de uma boa rota a ser escolhida entre uma origem e um destino na rede, sendo necessário modelar a decisão dos condutores de qual caminho tomar. PTV (2010) salienta que o processo de escolha de uma rota a partir de um conjunto de rotas possíveis é um caso especial do problema mais geral chamado de "modelagem da escolha discreta", onde as porcentagens dos motoristas que escolhem cada rota são calculadas a partir das funções de utilidade das rotas. Para modelar esse tipo de comportamento de escolha discreta, a função matemática mais utilizada e teoricamente melhor é o modelo Logit. Porém, existe uma grande desvantagem na utilização da função Logit para modelar a escolha de rotas. Essa função avalia somente a diferença absoluta das utilidades, ou seja, considera que a diferença entre duas rotas com tempos de viagem de 5 minutos e outra com 10 minutos é a mesma que a diferença entre uma rota com 105 minutos e outra com 110 minutos de tempo de viagem. Percebe-se que na realidade, rotas com tempos de viagem de 105 e 110 minutos são quase iguais, enquanto rotas com 5 e 10 minutos são bem diferentes. Dessa forma, tendo em vista encontrar uma solução para o problema acima explicitado, o VISSIM utiliza uma variante da função Logit para modelar a escolha de rota, conhecida por função de Kirchhoff:

$$P(R_j) = \frac{U_j^k}{\sum_i U_i^k}$$

Onde:

$U_j$  = Utilidade da rota  $j$ ;

$P(R_j)$  = Probabilidade da rota  $j$  ser escolhida;

$k$  = Sensitividade do modelo.

Nesta função, a diferença relativa da utilidade em função do fator de sensibilidade 'k' determina a distribuição dos veículos, de modo que haverá apenas uma pequena diferença nos volumes de tráfego entre as rotas de 105 e 110 minutos, enquanto que a rota de 5 minutos vai receber muito mais veículos do que a rota de 10 minutos.

#### 2.4.4 Dados de Saída do VISSIM

Ao final de cada simulação o VISSIM gera um arquivo que fornece uma lista detalhada de informações relativas à simulação, que são armazenados como arquivos de texto ou ainda, numa base de dados do próprio simulador. Os dados de saída podem ser configurados pelo usuário, permitindo ao mesmo, escolher somente os dados de interesse para a execução do trabalho e podem ser acessados a partir do menu “*Evaluation*”. Entre os dados de saída fornecidos pelo VISSIM têm-se os tempos de atraso nos links, tempos de viagem, consumo de combustível, emissões de poluentes, tamanho de filas, distância percorrida, número de veículos, velocidade e aceleração (PTV, 2010). Algumas das informações possíveis de serem extraídas do simulador, contidas nesse relatório final, podem ser visualizadas em tempo real durante a simulação.

#### 2.5 CALIBRAÇÃO DE MICROSSIMULADORES

Os modelos de simulação microscópica contêm numerosos parâmetros independentes que são usados para descrever características do fluxo de tráfego, do comportamento do condutor e das operações de controle de tráfego. Estes modelos oferecem um valor *default* para cada parâmetro, porém para que um simulador possa reproduzir de forma satisfatória o tráfego real, é necessária uma calibração adequada ao invés de utilizar os valores *default* (TOLEDO e KOUTSOPOULOS, 2004; HOURDAKIS *et al.*, 2003).

Geralmente, um simulador de tráfego é composto por vários submodelos, cada qual incluindo vários parâmetros que, conforme já salientado, devem ser calibrados para melhor representar o sistema que está sendo simulado. PARK e QI (2005) definem calibração como sendo o processo de ajuste dos parâmetros do simulador usando dados do mundo real para refletir as condições de tráfego local e afirmam que para alcançar o nível de fidelidade e credibilidade desejável no simulador de tráfego, a calibração do modelo é de extrema importância. No entanto, muitos desses parâmetros são difíceis de medir em campo, seja porque são complicados de isolar, seja devido à necessidade de coletar muitos dados (HOLLANDER e LIU, 2008).

Os simuladores de tráfego mais utilizados na atualidade foram desenvolvidos em outros países e nem sempre atendem às necessidades do nosso perfil de tráfego, sendo necessária a calibração e validação dos seus parâmetros. O objetivo da calibração é determinar os valores dos parâmetros cujas diferenças entre os resultados simulados e os

observados em campo sejam minimizadas (HELLINGA, 1998; KIM e RILETT, 2001; EGAMI *et al.*, 2004; HOLLANDER e LIU, 2008). Vários pesquisadores têm discutido os requisitos gerais de um procedimento para calibração de simuladores de tráfego. HELLINGA (1998) descreve os aspectos gerais da calibração, chegando a apresentar as etapas do processo, mas sem propor um procedimento generalizado para a calibração. SACKS *et al.* (2002) demonstraram um processo de validação informal e enfatizaram a importância da qualidade dos dados e da análise visual. PARK e SCHNEEBERGER (2003) propuseram um procedimento de calibração geral baseado em um modelo de regressão linear. Entretanto, eles não levaram em consideração as correlações entre os parâmetros. HOURDAKIS *et al.* (2003) buscam uma metodologia completa e sistemática para a calibração de qualquer simulador de tráfego. Além de citarem todas as etapas do processo de calibração, indicam procedimentos específicos de otimização para o ajuste dos parâmetros de entrada e ainda propõem técnicas estatísticas adequadas para a certificação da calibração. Porém, devido ao grande número e variedade de parâmetros de entrada nos diferentes modelos de microssimulação de tráfego, não existe consenso na literatura sobre a indicação de uma metodologia única para calibração desses modelos.

HOURDAKIS *et al.* (2003) afirmam que a calibração de simuladores de tráfego é frequentemente realizada por tentativa e erro, onde o êxito do processo depende da experiência do usuário. Sendo este processo, além de lento, pouco eficiente.

WANG e PREVEDOUROS (1998), afirmam que a calibração dos parâmetros dos simuladores é um processo demorado e tedioso, e ainda relatam que a necessidade de calibrar grande número de parâmetros dos modelos, para que possam representar as condições reais do tráfego, é a principal limitação dos simuladores de tráfego.

Com a evolução tecnológica dos modelos de simulação, o processo de calibração e validação tornou-se ainda mais complexo devido ao maior nível de detalhamento dos simuladores de tráfego, principalmente quando se trata de microssimuladores, o que implica no aumento do número de parâmetros a serem calibrados, assim como no número de funções a serem utilizadas para representar determinados comportamentos, como por exemplo, a maneira como ocorrem as mudanças de faixas e as interrupções de tráfego nas interseções semaforizadas. Como exemplo da grande quantidade de parâmetros de um microssimulador a ser calibrada, cita-se o caso do submodelo de *car-following* WIEDEMANN 99 utilizado pelo

VISSIM que traz dez parâmetros disponíveis para calibração, sendo que esse simulador permite a calibração de cerca de 30 parâmetros no total.

MARK *et al.* (2008) afirmam que a calibração de modelos microscópicos de simulação é bastante desafiadora e não é amplamente compreendida. É nesse sentido que, ao se avaliar a Tabela 2.2 que traz alguns trabalhos que realizaram a calibração de parâmetros comportamentais do microssimulador VISSIM, percebe-se que apesar do grande número de parâmetros possíveis de serem calibrados no microssimulador, poucos autores realizaram a calibração de mais de quatro parâmetros. Mesmo sabendo que utilização de um método computacional de otimização facilita a inclusão de uma maior quantidade de parâmetros a serem calibrados, somente no trabalho de PARK e QI (2006), que utilizou algoritmos genéticos, foram calibrados todos os parâmetros do modelo de WIEDEMANN 99, enquanto que no trabalho de ZHIZHOU (2005), que utilizou o mesmo método de otimização, foram calibrados somente 3 parâmetros.

Tabela 2.2 - Trabalhos que realizaram a calibração de parâmetros do VISSIM.

Autores	Default	Gomes et al. (2004) Freeway	Gomes et al. (2004) SoftCurve	Gomes et al. (2004) HardCurve	Park e Qi (2006)	Lownes e Machemehl (2006)	Ambadipudi et al. (2006)	Kim e Rilett (2007)	Zhizhou et al. (2005) Pico	Zhizhou et al. (2005) Fora Pico
<b>Parâmetros de Wiedemann-99</b>					AG			AG	AG	AG
Distância de Parada (m) - CC0	1,50	1,70	1,70	1,70	1,74	1,45		1,50	1,50	1,50
Tempo de Headway (s) - CC1	0,90	0,90	1,10	1,40	2,77	0,85	0,85	0,95	0,80	1,00
Variação de Following (m) - CC2	4,00				4,09			2,00	3,50	5,00
Espaço p/ entrar em Following - CC3	-8,00				-0,91			-9,00		
Limite de Following Negativo - CC4	-0,35	-2,00	-2,00	-2,00	-0,97	-1,00	-0,30	-0,25		
Limite de Following Positivo - CC5	0,35	2,00	2,00	2,00	0,86	1,00	0,30	0,25		
Veloc. Dependente da Oscilação - CC6	11,44				10,70			7,00		
Oscilação da Aceleração (m/s <sup>2</sup> ) - CC7	0,25				0,67					
Aceler. quando Parado (m/s <sup>2</sup> ) - CC8	3,50				2,06					
Aceler. a 80 km/h (m/s <sup>2</sup> ) - CC9	1,50				2,77					

Fonte: OLIVEIRA E CYBIS (2008).

Pode-se perceber a ainda, ao observar a Tabela 2.2, que na maioria dessas pesquisas os autores resolveram por calibrar os parâmetros CC0, CC1, CC4 e CC5, o que revela uma importância maior desses parâmetros na modelagem do tráfego. Todos esses trabalhos foram realizados em rodovias, exceto o trabalho de AMBADIPUDI *et al.* (2006) no qual modelaram uma rede de grande porte nos Estados Unidos.

Na utilização dos microssimuladores para modelar grandes malhas viárias urbanas, existe a preocupação de que a complexidade dos modelos torne o processo de calibração mais difícil, e isso tem um impacto negativo sobre a precisão dos resultados. MARK *et al.* (2008) afirmam ainda que os modelos de microssimulação, especialmente

aqueles que combinam lógica de roteamento com modelagem detalhada da dinâmica do fluxo de tráfego, possuem grande parte dos seus potenciais inexplorados para modelagem de redes de larga escala, caso das malhas viárias urbanas brasileiras.

Durante a revisão de pesquisas que envolvessem calibração de simuladores de tráfego foi percebido que não se tem dado atenção merecida à calibração para redes viárias urbanas semelhantes às encontradas nas grandes cidades brasileiras. Na revisão foi encontrado apenas um estudo de relevância realizado por MAIA (2007), no qual foi realizado um esforço de calibração objetivando simular uma malha viária urbana brasileira, utilizando um meso e um microsimulador. Em sua pesquisa, MAIA (2007) procurou aplicar um método de calibração que fosse replicável pela comunidade técnica. Porém, ao final do estudo, percebeu-se que os resultados gerados pelo mesosimulador foram relativamente condizentes com a realidade, enquanto que os resultados obtidos pelo microsimulador não foram aceitáveis para a representação da malha viária simulada.

É característica dos simuladores microscópicos de tráfego a grande quantidade de parâmetros e não existe um consenso na literatura quanto a um procedimento único de calibração e validação destes modelos. Dessa forma, diante da infinidade das possíveis aplicações para os simuladores de tráfego, e por não existir uma metodologia universal a calibração desses simuladores, mas somente algumas diretrizes gerais que devem ser seguidas, conseqüentemente a metodologia de calibração fica essencialmente a cargo de cada usuário do simulador (RAKHA *et al.*, 1996; HELLINGA, 1998). LAW e KELTON (2000) afirmam que, se houvesse um método definitivo para a calibração e validação de simuladores, talvez nem fosse necessário a utilização dos modelos de simulação, acrescentando que o método de calibração e validação apropriado depende não só da natureza do fenômeno que será simulado, mas também do uso que se pretende fazer do modelo.

Durante a revisão dos vários métodos de otimização existentes e possíveis de serem utilizados na calibração de microsimuladores, percebeu-se uma considerável quantidade de trabalhos que constatarem a eficiência da utilização dos algoritmos genéticos na calibração de parâmetros de simuladores de tráfego CORSIM (CUNHA e SETTI, 2006), PARAMICS (MA e ABDULHAI, 2002; MA *et al.*, 2007; SMITH *et al.*, 2008), VISSIM (PARK e QI, 2005), TWOPAS (BESSA JR e SETTI, 2009) e INTEGRATION (BESSA JR. *et al.*, 2008). Em todos esses estudos, os resultados obtidos a partir das simulações realizadas com os valores dos parâmetros otimizados pelo algoritmo genético foram melhores do que os

obtidos com os valores *default*. Na literatura há uma lacuna acerca da aplicabilidade deste tipo de algoritmo para calibração de redes viárias urbanas com as características encontradas nas grandes cidades brasileiras.

## 2.6 ALGORITMOS GENÉTICOS

De acordo com MITCHELL (1997), durante as décadas de 1950 e 1960, diversos cientistas da área da computação estudaram sistemas evolucionários com a ideia de que a teoria da evolução poderia ser usada como uma ferramenta de otimização para problemas na engenharia. Os sistemas desenvolvidos naquela época baseavam-se na ideia de que uma população de prováveis soluções para um determinado problema evoluía, ou seja, essas possíveis soluções eram melhoradas através da aplicação de determinados operadores genéticos.

DALORSOLETA (2010) afirma que apesar de simulações computacionais de sistemas genéticos terem início na década de 50, foi John Holland quem começou significativamente a desenvolver as primeiras pesquisas no tema e foi gradativamente refinando suas idéias, quando em 1975 publicou o seu livro “Adaptation in Natural and Artificial Systems”. Nesta publicação, John Holland apresentou o conceito de algoritmos genéticos, confirmando que processos da evolução natural de Darwin poderiam ser implementados em bases computacionais. Desde então, estes algoritmos vêm ganhando cada vez mais popularidade devido à eficácia comprovada em grande número de trabalhos desenvolvidos por pesquisadores de várias áreas. Atualmente, observa-se a aplicação de algoritmos genéticos nas avaliações de políticas de compra e venda de mercadorias, determinação de rotas e seqüenciamento de tarefas, em sistemas de construção de imagens faciais de criminosos a partir de testemunhas de um crime, montagens de escalas de trabalho, calibração de simuladores de tráfego, refinamentos de dados, construção de outras estruturas computacionais, economia e finanças, entre outras.

Os algoritmos genéticos (AG's) constituem uma técnica de busca e otimização, inspirada no princípio Darwiniano da seleção natural e reprodução genética (PACHECO, 1999). Os AG's utilizam um conjunto de soluções iniciais, denominadas cromossomos, que através de diversas operações evoluem até que se encontre uma solução que melhor atenda a algum critério específico de avaliação. Para que isto ocorra, a cada geração os cromossomos (soluções) são avaliados por uma função chamada *fitness* que mede o seu nível de aptidão, ou

seja, quão boa uma determinada solução é para o problema em questão. Os cromossomos que apresentarem a melhor *fitness* são selecionados para iniciarem uma próxima geração utilizando operadores como seleção, *crossover*, predação e mutação. Sendo assim, espera-se que através da utilização desses operadores, o conjunto de soluções de cada geração seja aprimorado, até que se obtenha a uma solução que atenda ao critério escolhido.

Uma característica que torna os algoritmos genéticos um método bastante atraente entre os diversos métodos de otimização, é que na implementação de um algoritmo genético só é necessário o programador fornecer informações de como avaliar seus indivíduos (soluções), ou seja, quão boa é uma possível solução, não sendo necessário grande conhecimento específico do problema a ser resolvido e nem informações de como deve ser realizada o procedimento de busca pelas as melhores soluções.

Segundo GROSZK et al. (2006) dentre os principais fatores que tem tornado os algoritmos genéticos uma técnica bem sucedida, pode-se destacar a simplicidade das operações e a facilidade de implementação, a eficácia na busca da região onde provavelmente encontra-se o máximo ou mínimo global e o bom desempenho em sua execução.

A principal desvantagem dos algoritmos genéticos relatada na literatura é o tempo de processamento, ou seja, os algoritmos genéticos podem ser mais lentos do que outros métodos de otimização. Porém, isso só chega a ser um problema considerável caso haja restrições severas de tempo.

Abaixo, na Tabela 2.2, consta um glossário com os termos mais utilizados nessa área da inteligência artificial.

Tabela 2.3 - Glossário de alguns termos utilizados na utilização dos AG's.

Termos	Significado
Gene	Representa uma variável do problema, é a menor parte do cromossomo.
Cromossomo ou Indivíduo	Cada possível solução, pode ser definida como uma sequência de genes que representam as variáveis do problema.
População	Formada pelos indivíduos do espaço de busca, representa as possíveis soluções de cada geração.

Termos	Significado
Pais	Indivíduos que transmitem suas características para a geração seguinte.
Filhos	Indivíduos da nova geração, gerados pelos “pais”.

Fonte: Autor

Apesar dos algoritmos genéticos serem muito utilizados para solução de problemas de otimização, nos quais já se sabe que são bastante eficientes e confiáveis, nem todos os problemas podem ter resultados aceitáveis ou mesmo ser representados adequadamente com o uso dessa técnica. Para se aumentar as chances de sucesso é necessário configurar o AG a aplicação considerando dois pontos importantes:

- o espaço de busca das soluções deve estar delimitado dentro de uma certa faixa de valores;
- deve ser possível definir uma função (*fitness*) que permita mensurar quão boa ou ruim é uma determinada solução.

De uma forma geral, a resolução de um problema utilizando algoritmo genético adota a realização dos passos:

- 1) define-se os valores para os parâmetros de controle e operadores genéticos do algoritmo, como, por exemplo, taxa de mutação e predação, tamanho da população, número de gerações e um ou mais critérios de parada de acordo com o problema em questão;
- 2) gera-se inicialmente uma população formada por um conjunto aleatório de indivíduos (possíveis soluções) dentro dos limites pré-estabelecidos;
- 3) durante o processo evolutivo, esta população é avaliada de acordo com a função de ajuste previamente escolhida, ou seja, a cada indivíduo é atribuída uma nota (*fitness*), assim possibilitando a comparação desses indivíduos com o intuito de encontrar o mais adequado à solução do problema;
- 4) através da definição de um critério de seleção, o melhor (mais adaptado) ou um conjunto dos melhores indivíduos é levado à próxima geração, enquanto uma

parcela dos indivíduos menos adaptados, são descartados e o restante permanece para a aplicação dos operadores genéticos;

- 5) por meio da escolha dos operadores genéticos mais indicados para a resolução do problema em questão, os indivíduos mantidos pelo processo de seleção, podem sofrer modificações em suas estruturas por meio de mutações e cruzamentos, gerando novas soluções para a geração seguinte;
- 6) este processo é executado várias vezes até que uma solução satisfatória, de acordo com a função de avaliação escolhida seja encontrada, ou seja, atingido um determinado critério de parada pré-estabelecido.

Ainda que o funcionamento de um AG possa parecer simples, estes algoritmos têm se mostrado poderosos mecanismos de busca, o que os tornam bastante atraentes para serem utilizados na calibração de redes viárias urbanas. Um ponto crítico da configuração do AG é a determinação dos valores dos seus parâmetros, discutido no item a seguir.

### 2.6.1 Parâmetros dos Algoritmos Genéticos

O desempenho dos algoritmos genéticos está diretamente relacionado a uma escolha adequada dos parâmetros de controle e dos operadores genéticos utilizados. O equilíbrio entre a capacidade de exploração de novas regiões do espaço e da intensificação da busca em regiões já visitadas deriva, principalmente da escolha dos seguintes parâmetros: tamanho da população, número de gerações, taxa de cruzamento ou *crossover*, taxa de predação e mutação. Abaixo segue a definição desses parâmetros:

- **Tamanho da população:** A população é formada por um determinado número de indivíduos, ou seja, as possíveis soluções dentro do intervalo limitado pré-estabelecido para o problema em pauta. Um número muito pequeno de indivíduos acarreta um espaço de busca reduzido podendo conduzir o algoritmo a um mínimo local, enquanto que um número muito elevado de indivíduos faz com que a convergência do algoritmo ocorra mais lentamente, pois o algoritmo irá explorar mais o campo de busca, conseqüentemente o número de cálculos de *fitness* por geração pode resultar num tempo computacional extremamente demorado;

- **Número de gerações:** É o número de iterações completas a partir do qual o algoritmo genético gera uma nova população. A literatura deixa claro que o tamanho da população e o número de gerações dependem da complexidade do problema e devem ser determinados experimentalmente. Deve-se lembrar que a combinação do número de indivíduos com o número de gerações definem diretamente o tamanho do espaço de busca a ser coberto.

Outros parâmetros, chamados operadores genéticos têm a função de inserir diversidade na população, ou seja, novas soluções na população, tais como elitismo, as taxas de predação e mutação. Segue a descrição desses parâmetros:

- **Elitismo:** Método de seleção que consiste em escolher o melhor indivíduo da população atual para transmitir seus genes à geração seguinte por meio do operador genético *crossover* (ou cruzamento). Há autores que recomendam escolher uma porcentagem de indivíduos que irão receber parte dos genes do melhor cromossomo;
- **Cruzamento ou *Crossover*:** Este operador é o principal mecanismo na geração de novas possíveis soluções no espaço de busca, o qual proporciona troca de informação genética entre indivíduos. O *crossover* produz um novo indivíduo a partir de outros dois indivíduos selecionados da população. Uma das formas como este indivíduo pode ser escolhido é chamada de elitismo e consiste em selecionar o melhor para se reproduzir com outros indivíduos da população. Esse processo visa garantir que as características dos melhores indivíduos sejam transmitidas para gerações futuras fazendo os indivíduos ficarem semelhantes, próximos a um ótimo local. A cada geração, vários cruzamentos são realizados. Adotando-se um baixo valor na taxa de cruzamento implica em pouco aproveitamento da informação existente podendo tornar o algoritmo muito lento e um alto valor dessa taxa pode provocar uma convergência prematura e a perda de bons indivíduos;
- **Predação:** Esse operador genético elimina os indivíduos menos adaptados e consequentemente, insere diversidade genética na população ao repor os indivíduos descartados por novos indivíduos aleatórios. Lembrando que essa alteração não garante que o indivíduo que substituirá o indivíduo predado seja

melhor. Essa operação de predação acontece num período determinado, como por exemplo, a cada geração ou após um número pré-determinado de gerações;

- **Mutação:** A mutação é responsável por inserir material genético novo, substituindo algumas partes dos cromossomos por novos valores escolhidos aleatoriamente, visando garantir que as gerações seguintes continuem evoluindo e ainda, restaurar genes perdidos durante o cruzamento ou até mesmo na própria mutação. Uma taxa de mutação pequena conduz o algoritmo a ficar estagnado. Já um alto valor da taxa de mutação conduz o algoritmo a uma busca aleatória. Os efeitos das mutações chamadas benéficas, que melhoram a solução, persistem ao longo das gerações, enquanto que os efeitos das mutações ruins tendem a desaparecer.

Esses dois últimos operadores, a mutação e a predação, não devem ser aplicados em gerações consecutivas, somente em gerações intermitentes, pois assim, a diversidade pode ser melhor inserida na população através do *crossover*. Dessa forma define-se o parâmetro diversidade como sendo o múltiplo do número de gerações em que serão aplicadas predação e mutação (BESSA JR. E SETTI, 2012).

Conforme SOARES (1997), a escolha ideal dos valores dos parâmetros do algoritmo é um problema não linear e dependente do tipo de problema tratado. Isso dificulta encontrar uma boa configuração para generalizar a execução de qualquer tipo de problema. Normalmente, os valores dos parâmetros são pré-fixados. No entanto, por ser um processo dinâmico que apresenta evolução no tempo e no espaço das possíveis soluções, a predefinição geral de um conjunto de parâmetros satisfatórios é bem difícil (LINDEN, 2008). É importante salientar que os efeitos decorrentes da escolha inadequada desses parâmetros vão desde aumento no tempo de convergência, convergência prematura, estagnação da busca, maior necessidade de recursos computacionais até a não convergência para uma solução viável, tornando a escolha pelo uso desse método de otimização inconveniente.

A literatura mostra algumas pesquisas que utilizaram AG para calibração dos parâmetros de simuladores de tráfego. KIM *et al.* (2005) realizaram a calibração de seis parâmetros comportamentais de condução, incluindo parâmetros de *car-following* e *lane-change* do microssimulador VISSIM numa rodovia no Texas, utilizando um AG com as

seguintes características: número de gerações = 100, número de indivíduos = 30, taxa de mutação = 30% e taxa de crossover = 50%.

CUNHA *et al.* (2009) usaram AG para calibrar modelos de performance de veículos em dois simuladores de tráfego, CORSIM e INTEGRATION. Os parâmetros do AG utilizado na calibração do CORSIM e do INTEGRATION foram, respectivamente: número de gerações = 50, número de indivíduos = 40, taxa de prediação = 50%, taxa de mutação = 30% e número de gerações = 50, número de indivíduos = 40, taxa de prediação = 30%, taxa de mutação = 10%.

BESSA JR e SETTI (2012), com o objetivo de desenvolver relações fluxo-velocidade para rodovias de pista simples no Brasil usando simulação microscópica, escolheram algoritmos genéticos como método de otimização para calibrar o simulador CORSIM. Esse AG possuía a seguinte configuração: número de gerações = 100, número de indivíduos = 20, taxa de prediação = 20%, taxa de mutação = 30%.

EGAMI (2006), ao propor uma adaptação de procedimento para análise do nível de serviço e capacidade para rodovias de pista simples no Brasil utilizou o simulador TRARR, sendo necessário calibrar seis parâmetros relacionados ao comportamento dos condutores quanto ao desempenho dos veículos e para isso fez uso de um algoritmo genético com os seguintes valores de parâmetros: número de gerações = 350, número de indivíduos = 100, taxa de crossover = 50%, taxa de mutação = 30%.

Ao observar os resultados dos trabalhos acima citados, percebeu-se que em todos eles, as simulações utilizando os valores obtidos para os parâmetros calibrados pelos AG's, forneceram melhores resultados do que utilizando os valores *default*.

Um ponto a ser considerado é que os AG's, como qualquer outro método de otimização, necessitam de uma medida de ajuste (função *fitness*) para avaliar o quão próximo estão os dados simulados dos dados observados em campo. Conforme SPIEGELMAN *et al.* (2010), uma série de medidas agregadas são utilizadas com esse objetivo, e explicam que são medidas agregadas pois combinam todas as medidas em uma única medida de ajuste.

Ainda de acordo com SPIEGELMAN *et al.* (2010), as medidas agregadas mais utilizadas são o erro absoluto médio (MAE, traduzido do inglês *mean absolute error*), o erro proporcional absoluto médio (MAPE ou MAER, traduzido do inglês *mean absolute*

*proportional error* e *mean absolute error ratio*, respectivamente), a raiz quadrada do erro médio (RMSE, traduzido do inglês *root mean squared error*) e a raiz quadrada do erro percentual médio (RMSPE, traduzido do inglês *root mean square percent error*), cada uma apresentando vantagens e desvantagens. A seguir são mostradas as respectivas equações dessas medidas:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |O_i - E_i|$$

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - E_i|}{O_i}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (O_i - E_i)^2}$$

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{O_i - E_i}{O_i}\right)^2}$$

Onde:

$O_i$  representa a medida de desempenho observada no campo;

$E_i$  representa a medida de desempenho simulada pelo modelo e;

$N$  representa o número de observações.

Segundo Toledo e Koutsopoulos (2004), as duas primeiras medidas citadas, MAE e MAPE, são capazes de indicar uma sub ou superestimação das medidas simuladas. Para isso devem ser aplicadas em pontos distintos individualmente ao invés de serem aplicadas simultaneamente ao conjunto de dados, pois dessa forma, fornecem uma visão da distribuição espacial e temporal dos erros e ajudam a identificar deficiências no modelo. Enquanto que as duas últimas, RMSE e RMSPE, quantificam o erro global do simulador e atribuem uma penalização maior aos grandes erros.

KIM *et al.* (2005) ressaltam que uma medida de ajuste agregada bastante utilizada na comparação dos valores das medidas de desempenho simuladas e observadas em campo

durante a calibração de parâmetros de um simulador de tráfego é o erro médio absoluto proporcional (MAER). O conjunto de parâmetros que gerar o menor MAER é considerado o "melhor". Dessa forma, quando uma medida de ajuste agregada como o MAER é utilizada, pressupõe-se que o conjunto de parâmetros que produz o valor mínimo do erro é o melhor indicador das condições reais do tráfego. Entretanto, ainda de acordo com KIM *et al.* (2005), essa suposição tem como premissa que as distribuições dos tempos de viagem simulados e observados são idênticas, tendo como única diferença a tendência central.

Para finalizar este tópico é importante salientar que não foi encontrado na literatura um estudo de análise de sensibilidade dos valores dos parâmetros do AG na calibração de redes urbanas microsimuladas, o que foi um dos principais motivos desta pesquisa de mestrado.

## **2.7 MEDIDAS DE DESEMPENHO**

Entende-se por medida de desempenho aquelas medidas que são utilizadas para analisar o comportamento de um sistema estudado e que servem de subsídio ao analista como uma informação quantitativa necessária para a tomada e o monitoramento de decisões. O comportamento do sistema real é geralmente mensurado por essas medidas de desempenho do tráfego, tais como velocidade, grau de saturação, comprimento da fila, e assim por diante, que para fins práticos são coletados automaticamente por detectores ou manualmente (HOURDAKIS, 2003).

SPIEGELMAN *et al.*(2010) relatam as principais aplicações das medidas de desempenho utilizadas na análise de sistemas de transportes:

1. Prover uma visão global;
2. Avaliar facilidades ou desempenho do sistema;
3. Calibrar modelos;
4. Identificar problemas;
5. Desenvolver e avaliar melhorias;
6. Formular programas e prioridades, entre outras.

Ainda conforme o trabalho de SPIEGELMAN *et al.*(2010), uma boa medida de desempenho deve apresentar vários atributos que são explanados de acordo com a Tabela abaixo:

Tabela 2.4 - Atributos desejáveis numa medida de desempenho.

Atributo	Descrição
<b>Capacidade de discriminação</b>	Deve ser capaz de diferenciar um componente individual que afete o desempenho do sistema.
<b>Capacidade de integração</b>	Deve ser capaz de integrar aspectos ambientais, sociais e econômicos.
<b>Aceitabilidade</b>	A comunidade deve participar na identificação e desenvolvimento das medidas de desempenho.
<b>Acurácia</b>	Deve ser baseada na informação precisa, conhecendo-se a qualidade e origem.
<b>Nível de detalhamento ideal</b>	Deve ser especificado e utilizado um nível de detalhamento apropriado para que seja capaz de responder as questões.
<b>Objetividade</b>	Deve possuir um foco ou uma referência contra a qual possa ser comparada.
<b>Mensurabilidade</b>	Os dados devem estar disponíveis e é preciso existir ferramentas para executar os cálculos necessários.
<b>Multidimensionalidade</b>	Deve permitir a utilização ao longo do tempo, em diferentes áreas geográficas, com diferentes escalas de agregação e inseridas num contexto de problemas multimodais.

Atributo	Descrição
<b>Não influenciável</b>	Não deve ser influenciada por fatores externos que são difíceis de controlar ou os quais o engenheiro não está ciente.
<b>Relevância</b>	Deve ser compatível com todos os objetivos e finalidades.
<b>Sensibilidade</b>	Deve ser capaz de detectar um certo nível de variação que ocorra no sistema de transporte.
<b>Mostrar tendências</b>	Deve ser capaz de mostrar tendências e fornecer previamente avisos a respeito de problemas e tendências irreversíveis.
<b>Temporalidade</b>	Deve ser baseada em informação temporal que pode ser atualizada a qualquer momento.
<b>Compreensibilidade</b>	Deve ser compreensível e fácil de interpretar.

---

Fonte: Adaptado de SPIEGELMAN *et al.*(2010) .

Abaixo são listadas algumas medidas de desempenho utilizadas na engenharia de tráfego conforme relatado em FHWA (2007):

- Nível de serviço;
- Tempo de viagem;
- Velocidade;
- Incidente;
- Tempo de congestionamento;
- Ocupação veicular;

- Atraso causado por incidente;
- Densidade.

O HCM (TRB, 2000), também apresenta várias medidas de desempenho para a utilização em análises de estudo do tráfego, tais como:

- Atraso;
- Velocidade;
- Capacidade;
- Densidade de congestionamento;
- Filas;
- Nível de serviço;
- Número de paradas;
- Tempos de viagens, etc.

Vale salientar que apesar da Tabela 2.3 expor uma lista desejável de atributos que possa auxiliar o engenheiro de transporte na escolha de uma medida de desempenho, será muito raro conseguir uma medida que possua quase todas as qualidades citadas, fazendo com que se opte por escolher uma medida que se adeque ao estudo em particular, porém é importante tentar somar a maior quantidade possível de atributos desejáveis. Torna-se notório que a escolha da medida de desempenho ou do conjunto de medidas a serem utilizadas depende dos objetivos do estudo e dos dados de campo disponíveis.

De acordo com HELLINGA (1998), os simuladores de tráfego permitem a obtenção de diversas medidas de desempenho, tais como: o volume de tráfego, velocidade, tamanho da fila, tempo de viagens no link, tempo de viagem da origem ao destino, comprimento médio de viagens, número médio de paradas, consumo médio de combustível, emissões de hidrocarbonetos (HC), monóxido de carbono (CO) e óxido nitroso (NOx), e ainda risco de acidentes.

SPIEGELMAN *et al.*(2010) relatam que os dados de saída gerados pelos simuladores podem ser classificados em 3 tipos distintos:

1. Medições baseadas em pontos;
2. Medições baseadas nos links;
3. Medições nos corredores / sistema.

Contudo, percebe-se que das três classes, as medições baseadas nos *links* e corredores são as mais úteis, pois permitem ao analista realizar um estudo espacial e temporal das tendências do tráfego.

SPIEGELMAN *et al.*(2010) realizaram uma revisão sobre as medidas de desempenho mais relevantes para análise de sistemas de transportes. De acordo com este autor, o tempo de viagem é uma importante medida de desempenho para a análise de operações de tráfego e que esta medida pode ser obtida para um *link*, um corredor ou para um par OD. Relata também que o tempo de viagem pode ser analisado durante apenas um pequeno intervalo de tempo ou por um dia inteiro. No entanto, percebe-se que a escolha da medida de desempenho mais adequada deve ser obtida realizando uma análise de cada possível medida de desempenho com o objetivo do estudo.

## **2.8 PROCESSO DE VALIDAÇÃO**

A eficácia de um simulador na avaliação de estratégias de gestão do tráfego reside na sua capacidade de reproduzir de forma satisfatória o tráfego real, o que exige um processo de calibração e validação adequado ao invés de utilizar os valores *default* dos seus parâmetros. O modelo é considerado validado quando a diferença entre os valores simulados e observados da medida de desempenho utilizada encontra-se dentro do limite estabelecido como aceitável (TOLEDO e KOUTSOPOULOS, 2004). Para validar um modelo de simulação, o simulador deve ser capaz de emular medições reais e produzir uma série de valores simulados correspondentes (HOURDAKIS *et al.*, 2003).

O procedimento de validação, ou seja, a verificação do ajuste do modelo à realidade é uma etapa importante no processo de análise, pois verifica sua consistência com os dados de campo, aumentando a confiabilidade dos resultados, porém, é um processo complexo e que demanda tempo. Vários trabalhos, tais como FELLENDORF e VORTISCH

(2001); SACKS *et al.* (2002); TOLEDO e KOUTSOPOULOS (2004), se preocuparam em analisar o processo de validação, porém não há procedimento capaz de validar todo e qualquer tipo de modelo (SILVA e TYLER, 2001).

O exercício de validação é tão somente uma calibração mais rigorosa, inclusive, todos os métodos de comparação dos dados observados e simulados utilizados na calibração podem ser repetidos nessa fase e vice-versa (HOLLANDER E LIU, 2008). No entanto, uma recomendação bastante relatada na literatura é que, como essa etapa é realizada para confirmar o poder de predição do modelo, a comparação das medidas de desempenho na etapa de validação deve ser realizada com uma amostra de dados diferente da utilizada na etapa de calibração, objetivando evitar o viés do modelo para os dados utilizados para calibrá-lo.

Na maioria das vezes, percebe-se que as medidas de desempenho que foram utilizadas na etapa de calibração são as mesmas utilizadas na validação. Entretanto, aconselha-se para essa etapa, a verificação uma ou mais medidas de desempenho que não foram utilizadas na fase de calibração, com o intuito de obter um maior grau de confiança no modelo.

MAIA (2007) relata que a escolha da metodologia de validação é sempre dependente do problema que será estudado e que este processo não deve ocorrer somente ao final da simulação, mas deve ser constantemente realizada a validação durante as implementações e alteração no desenvolvimento de sistemas.

De acordo com HOLLANDER E LIU (2008), várias técnicas são utilizadas no estágio de validação do modelo, como por exemplo, a validação visual, na qual é realizada uma inspeção na apresentação gráfica da rede modelada enquanto o modelo é executado, no intuito de verificar comportamentos considerados incomuns. Porém, ainda ressaltam que apesar da visualização permitir, de forma eficiente, a detecção de erros significativos, não pode substituir um procedimento de validação quantitativo.

A análise de correlação e regressão é um dos possíveis métodos estatísticos utilizados na validação de microssimuladores de tráfego. MAIA (2007) utilizou análise de correlação e regressão para a realização da validação da sua rede, bem como utilizou também gráficos de dispersão dos tempos de viagens e volumes nos arcos da rede viária. No trabalho os valores obtidos pela análise de regressão linear, ao utilizar o microssimulador, não foram satisfatórios pois os valores de  $R^2$  foram bastante baixos, iguais a 0,36 para os volumes e 0,14

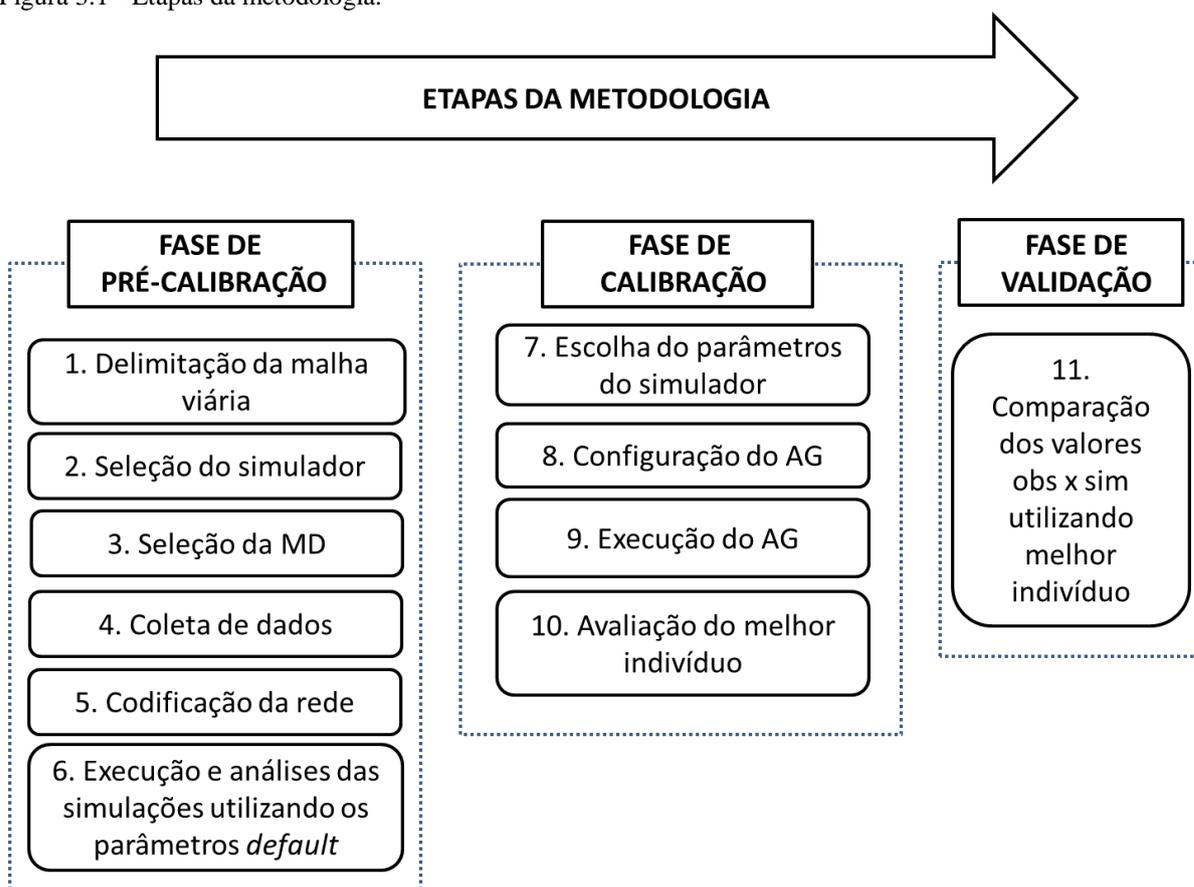
para os tempos de viagem. Já no trabalho de LIU (2010), que também realizou um procedimento de validação baseado em regressão linear para avaliar o tempo de aceitação de brecha de numa simulação desenvolvida no simulador DRACULA, obteve-se um valor de  $R^2$  igual a 0,96.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA DE ANÁLISE

Esse capítulo apresenta a metodologia de análise utilizada nessa pesquisa. Essa metodologia divide-se em três etapas conforme mostrado na Figura 3.1: pré-calibração, calibração e validação da rede microssimulada.

Figura 3.1 - Etapas da metodologia.



Fonte: Autor

Na primeira etapa, denominada Fase de Pré-Calibração, delimita-se a malha viária a ser simulada, define-se o microssimulador, bem como as medidas de desempenho que serão utilizadas. Os dados a serem coletados são as medidas de desempenho e os dados de entrada do simulador, que incluem os parâmetros do modelo que serão diretamente informados pelo usuário. Em seguida, realiza-se a codificação da rede, e por fim, realizam-se as simulações e as análises utilizando os valores *default* dos parâmetros de calibração do microssimulador. Vale ressaltar que os resultados desta fase podem sugerir que mais algum parâmetro seja coletado em campo. Desta forma a rede é avaliada novamente com os novos dados de entrada,

e a fase de Pré-Calibração é finalizada quando se considera que a Fase de Calibração pode reduzir o erro a valores desejáveis.

Na segunda etapa, chamada Fase de Calibração, realiza-se a calibração propriamente dita. Com base na análise das simulações da etapa anterior, decide-se quais parâmetros serão calibrados e quais permanecerão com seus valores *default*. São definidos também os intervalos de busca dos valores aceitáveis dos parâmetros. Em seguida é definida a configuração do AG, que consiste na escolha dos valores de seus parâmetros e operadores genéticos. Então, executa-se o AG e o melhor conjunto de parâmetros (indivíduo) passa por uma avaliação conceitual, na qual o valor de cada parâmetro calibrado é analisado qualitativamente com o objetivo de verificar se os valores são condizentes com o fenômeno em análise. O produto final decorrente dessa fase é o conjunto dos melhores valores encontrados para os parâmetros da rede viária microssimulada.

Na terceira e última etapa, denominada de Fase de Validação, realizam-se várias análises valendo-se de ferramental estatístico, mais especificadamente análise de correlação e estimação intervalar da média das diferenças entre os valores simulados e observados. O objetivo principal desta fase é verificar se o modelo calibrado é suficientemente capaz de gerar bons resultados utilizando um conjunto de dados diferente do que foi usado na fase de calibração. Nessa etapa também foi perpetrada uma comparação dos resultados com os obtidos no trabalho de MAIA (2007), o qual realizou um esforço de calibração para a mesma rede viária.

### **3.1 FASE DE PRÉ-CALIBRAÇÃO**

#### **3.1.1 Delimitação da área de estudo**

Como primeiro passo foi necessário escolher a área de estudo. Alguns motivos foram relevantes para essa escolha, tais como, já ter sido realizada uma tentativa de microssimular essa área numa pesquisa desenvolvida no ano de 2007 no Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (DET – UFC), a facilidade de coleta de dados devido a maioria das vias possuírem laços detectores, como também todo o controle semafórico ser operado em tempo real pelo sistema adaptativo SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*) e por se possuir grande conhecimento prévio dessa área.

### **3.1.2 Escolha do simulador**

Os critérios para a escolha de uma ferramenta computacional dependem principalmente dos objetivos pretendidos no estudo, bem como se deve levar em conta o nível de conhecimento do usuário em relação ao simulador escolhido. Visando a correta escolha do simulador a ser utilizado para microssimular a malha viária selecionada, consultou-se o HCM (TRB, 2000) e FHWA (2004), pois conforme já relatado, neles estão descritos critérios gerais para a realização da escolha de ferramentas computacionais. Contudo, aqui foi dada maior ênfase para a capacidade, limitações, facilidade de uso e conhecimento prévio do simulador.

### **3.1.3 Escolha das medidas de desempenho**

Durante a revisão da literatura acerca de como deve ser realizada a escolha das medidas de desempenho, percebeu-se que a escolha mais adequada é atingida realizando uma análise de cada possível medida de desempenho com os objetivos do estudo. Após uma análise das medidas que atenderiam bem aos objetivos dessa pesquisa, optou-se por utilizar uma medida de desempenho que fosse fácil de ser coletada em campo, bem como tornasse possível a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados do trabalho citado anteriormente, realizado na mesma área utilizando outra metodologia.

### **3.1.4 Coleta de dados**

Nesta pesquisa não foi realizada nenhuma coleta de dados em campo, visto que já se possui grande conhecimento em relação aos elementos físicos da malha viária estudada e o DET-UFC já dispunha da maioria dos dados necessários para a análise, incluindo uma matriz OD da região a ser modelada. Os dados de entrada necessários para a simulação que não estavam disponíveis no DET foram solicitados aos órgãos responsáveis, como por exemplo, dados referentes aos planos semaforicos foram cedidos pelo CTAFOR (Controle de Tráfego em Área de Fortaleza) e dados de transporte coletivo pela ETUFOR (Empresa de Transporte Urbano de Fortaleza).

### **3.1.5 Codificação da rede de simulação**

Em qualquer simulador de tráfego é necessário primeiramente codificar a malha viária que será modelada, o que torna possível a visualização da topologia da rede, bem como a inserção dos elementos físicos característicos da malha em estudo. A codificação da malha

viária no microsimulador exigiu um esforço considerável, pois devido esse passo ser de fundamental importância para o sucesso da simulação, foi necessário bastante cuidado na importação dos dados geométricos, de controle, da demanda e comportamento do tráfego da área em estudo para o simulador. Uma imagem digitalizada da malha viária a ser simulada foi utilizada como plano de fundo para auxiliar no desenho dos *links* e outros elementos da rede.

### **3.1.6 Realização das execuções com os parâmetros *default***

O início das simulações acontece nessa fase. Foram executadas algumas simulações utilizando os valores *default* dos parâmetros com o intuito de avaliar o grau de representatividade da rede não-calibrada, bem como verificar visualmente a existência de algum comportamento no tráfego, durante a simulação, que indicasse um erro grosseiro na fase de codificação da rede. Caso os valores simulados estejam dentro dos limites de semelhança previamente estabelecidos como aceitáveis em relação aos dados medidos em campo e os valores dos parâmetros estejam de limites aceitáveis, o simulador já pode ser utilizado para análises do cenário em estudo. Entretanto, se os valores fornecidos pelo simulador não correspondam à realidade em campo, será necessário que seja realizada a calibração da rede utilizando o algoritmo genético desenvolvido para tal propósito. A principal importância deste passo é garantir que não haverá desperdício de tempo calibrando parâmetros do simulador que já estão suficientemente capazes de modelar a situação do local em estudo. Contudo, para aplicações em redes viárias urbanas, acredita-se que seja improvável acontecer de não haver a necessidade de calibração, pois a como já relatado, os principais simuladores disponíveis no mercado são produzidos e pré-calibrados para a realidade de condução referente aos países de origem, realidade que é bem diferente das grandes cidades brasileiras.

## **3.2 FASE DE CALIBRAÇÃO**

### **3.2.1 Escolha dos parâmetros a serem calibrados**

A etapa de definição dos parâmetros a serem calibrados é um dos pontos mais importantes no procedimento de calibração, pois esta escolha exerce influência direta em todo o restante do processo. Geralmente, a escolha do conjunto de parâmetros a ser calibrado acontece de forma um tanto subjetiva, baseada exclusivamente no julgamento do engenheiro ou analista de tráfego responsável pelo estudo e, em outros casos, baseada na literatura.

Diante do relato de PTV (2010), que diz ser o tráfego em áreas urbanas melhor representado pelo algoritmo de *car-following* WIEDEMANN 74 e que o algoritmo WIEDEMANN 99 é mais indicado para representação dos movimentos dos veículos em rodovias, foi realizada uma análise minuciosa dos parâmetros disponíveis para calibração em cada um dos modelos e optou-se por calibrar os parâmetros do algoritmo de *car-following* WIEDEMANN 99, mesmo sendo urbana a região a ser simulada nesta pesquisa, pois apesar de ser mais complexo e conter um maior número de parâmetros a serem calibrados, acredita-se que este seja capaz de representar mais fielmente a realidade do sistema viário em questão, além disso, esse modelo é o mais utilizado na literatura para este fim. Outro fator que também foi considerado ao optar pelo modelo que possui um maior número de parâmetros, é que a automação proporcionada ao utilizar um método de otimização como os AG's, favorece a inclusão de uma maior quantidade de parâmetros a serem calibrados. Em relação ao restante dos parâmetros calibráveis, tais como os relativos às características dos veículos e da própria malha viária, foram utilizados valores encontrados na literatura aplicáveis a este estudo de caso, como por exemplo, o valor do parâmetro correspondente à brecha crítica citado no estudo de MAIA (2007).

### 3.2.2 Configuração do AG

Para a realização dessa pesquisa, utilizou-se algoritmos genéticos como método de otimização, justificando essa escolha por reconhecer duas grandes vantagens na utilização destes para calibração de parâmetros de simuladores, a saber:

1. os algoritmos genéticos, por serem um processo de automação computacional, permitem que sejam calibrados uma quantidade maior de parâmetros;
2. celeridade na obtenção dos melhores valores para os parâmetros selecionados para a calibração.

O algoritmo genético utilizado nessa pesquisa para a calibração dos parâmetros do simulador VISSIM foi desenvolvido em linguagem LUA, no laboratório de engenharia da Universidade de São Carlos sob a supervisão do Prof. Dr. Reinaldo Setti. Esse AG é capaz de calibrar todos os submodelos do simulador VISSIM voltados para o tráfego de veículos: o modelo de *car-following*, de *lane-changing* e de reação ao sinal amarelo de semáforos, como também suficientemente capaz de calibrar o deslocamento de pedestres. Abaixo segue uma breve explicação do funcionamento do AG utilizado:

1. inicialmente definem-se os limites (espaços de busca) de cada parâmetro do microssimulador a ser calibrado baseando-se em intervalos aceitáveis de valores para cada parâmetro;
2. gera-se uma população inicial com indivíduos escolhidos aleatoriamente com base no espaço de busca definido para cada parâmetro;
3. avalia-se o *fitness* de cada um dos indivíduos da população, que representa o erro proporcional absoluto médio (MAPE) entre a medida de desempenho obtida em campo e pelo simulador. Cada indivíduo é simulado repetidas vezes de acordo com o número de replicações pré-estabelecido, sendo cada replicação diferenciada apenas pela semente aleatória utilizada durante a simulação. Utiliza-se o valor médio das replicações da simulação para o cálculo do erro referente ao indivíduo;
4. o indivíduo com o melhor *fitness* é escolhido para distribuir os seus genes para a próxima geração. Esse indivíduo cruza com todos os outros indivíduos para criar a próxima geração de cromossomos;
5. ocorrerá a aplicação dos operadores genéticos se o número da geração menos 1 for múltiplo do número de gerações escolhido para a aplicação da diversidade. Nesse caso, para continuar a produção da próxima geração, são selecionados uma quantidade de genes a serem mutados, igual a taxa de mutação multiplicada pelo número de genes de cada cromossomo multiplicado pelo número de indivíduos, que serão substituídos por outros genes produzidos randomicamente. Nessa mesma geração, uma quantidade dos piores indivíduos, igual a taxa de predação multiplicada pelo número de indivíduos, serão eliminados da população sendo criados outros em seus lugares aleatoriamente;
6. com a nova geração formada, o ciclo se reinicia no passo 3 até que o critério de parada seja atingido (número máximo de gerações), em que a melhor solução é aquela que produz as menores diferenças entre as medidas de desempenho simuladas e observadas em campo, de acordo com a função de ajuste definida.

Ao escolher pela utilização dos AG's como método de otimização, deve-se definir uma função de ajuste (*fitness*), função esta que será utilizada para avaliar quão bom é um indivíduo gerado no processo, bem como os valores para os parâmetros de controle e operadores genéticos do AG. Aqui foi selecionada como medida de ajuste o MAPE, por ser uma medida de fácil entendimento. Além disto, como ressaltado por SPIEGELMAN *et al.* (2010), esta medida é mais adequada para aplicações em que os valores medidos em campo não apresentam grande variação, pois é o que acontece com os tempos de viagem nas vias da malha viária selecionada durante o horário de pico.

Objetivando encontrar os valores dos parâmetros e operadores do AG que fossem ideais para esta pesquisa, foi realizada uma revisão em estudos que utilizaram este método de otimização para calibração de microssimuladores, bem como, a realização de uma minuciosa análise de sensibilidade desses parâmetros.

### **3.2.3 Execução do AG no processo de calibração**

A execução do AG é iniciada somente após terem sido definidos todos os parâmetros do simulador que deverão ser calibrados e seus intervalos aceitáveis, como também os valores que serão utilizados para os parâmetros do AG. Ao executar o algoritmo pela primeira vez é necessário que seja definido um ou mais critérios de parada, geralmente dois, o número máximo de gerações e um valor satisfatório para a função de ajuste utilizada como função *fitness*, pois caso o AG atinja esta situação pré-definida, as simulações são interrompidas e o resultado gerado pelo AG (melhor indivíduo) deve ser avaliado. Para essa pesquisa utilizou-se somente o número máximo de gerações como critério de parada. Caso o melhor indivíduo, após uma análise inicial, seja considerado aceitável para a realidade em estudo, deve-se partir para o passo seguinte que é a etapa de validação.

## **3.3 FASE DE VALIDAÇÃO**

### **3.3.1 Validação da rede calibrada**

O objetivo da etapa de validação é verificar se a rede, após a realização completa da fase de calibração, está apta a replicar satisfatoriamente a realidade do tráfego da malha viária em estudo. Da mesma forma que ocorre na calibração, na etapa de validação, é feita a comparação dos dados gerados pelo simulador com os dados coletados em campo. Contudo,

nessa fase, exige-se um maior rigor estatístico para a análise dessas comparações, já que a conclusão desta fase resulta no teste final do modelo a ser utilizado.

Nessa última etapa, foram utilizados métodos de análise de correlação e regressão, bem como a medida de ajuste MAPE para verificar a capacidade da rede calibrada em replicar o comportamento do tráfego utilizado um conjunto de dados distinto dos dados utilizados para a etapa de calibração desta pesquisa, conforme indicação na literatura.

## CAPÍTULO 4

### ESTUDO DE CASO

#### 4.1 FASE DA PRÉ-CALIBRAÇÃO

##### 4.1.1 Delimitação da área de estudo

A malha viária selecionada está situada numa das regiões mais adensadas da cidade de Fortaleza e foi a mesma utilizada por Maia (2007). A região é reticulada e compreende 4 x 2 quarteirões cobrindo uma área de dimensões 600m x 400m, onde se encontram prédios residenciais e estabelecimentos comerciais com intensa atividade, o que resulta em velocidades nos principais corredores de aproximadamente 10 km/h na hora de pico. A malha é composta por nove vias, sendo três na direção leste-oeste, e seis na direção norte-sul. Há 15 interseções em nível, das quais 8 são controladas por semáforos operados pelo sistema adaptativo SCOOT (*Split Cycle Offset Optimization Technique*), sob a gerência do CTAFOR (Controle de Tráfego Avançado de Fortaleza), cujos dados auxiliam no processo de calibração e validação da rede.

Figura 4.1 - Imagem da malha viária utilizada na pesquisa.



Fonte: Google

#### 4.1.2 Seleção do simulador

Para a realização desse estudo de caso, optou-se por utilizar o microsimulador VISSIM. Os principais motivos que justificaram a escolha pela utilização desse microsimulador foram:

1. ser amplamente consolidado na comunidade científica;
2. possibilitar a modelagem de malhas viárias urbanas atendendo bem ao objetivo deste estudo;
3. capacidade de fornecer medidas de desempenho em cada *link* da rede;
4. possuir uma forma relativamente simples, “amigável” e rápida de codificar uma rede;
5. utilizar o modelo comportamental de *car-following* psico-físico;
6. ser o simulador com o qual se está mais bem familiarizado e;
7. o fato deste microsimulador estar disponível no grupo de pesquisa.

#### 4.1.3 Seleção da medida de desempenho

Para a escolha da medida de desempenho a ser utilizada nessa pesquisa foi realizada uma revisão da literatura a respeito desse tema, o que conduziu à escolha do tempo de viagem médio agregado por via devido a 05 principais motivos:

1. é uma medida comumente utilizada pela comunidade científica para verificar e analisar as condições de fluidez do tráfego;
2. o tempo de viagem é indiretamente a medida de desempenho utilizada pelo HCM (2000) para avaliar o nível de serviço de uma via;
3. é relativamente fácil a coleta destes dados em campo;
4. é uma medida de fácil entendimento;
5. foi a medida de desempenho utilizada na etapa de calibração do microsimulador INTEGRATION no trabalho desenvolvido por MAIA (2007).

#### 4.1.4 Coleta dos dados

Como já relatado no capítulo 3, nesta pesquisa não foi realizada nenhuma coleta de dados em campo, visto que já se possui grande conhecimento em relação aos elementos físicos da malha viária estudada e o Departamento de Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará (DET-UFC) já dispunha da maioria dos dados necessários, incluindo uma matriz OD da região de estudo que foi utilizada no trabalho de MAIA (2007).

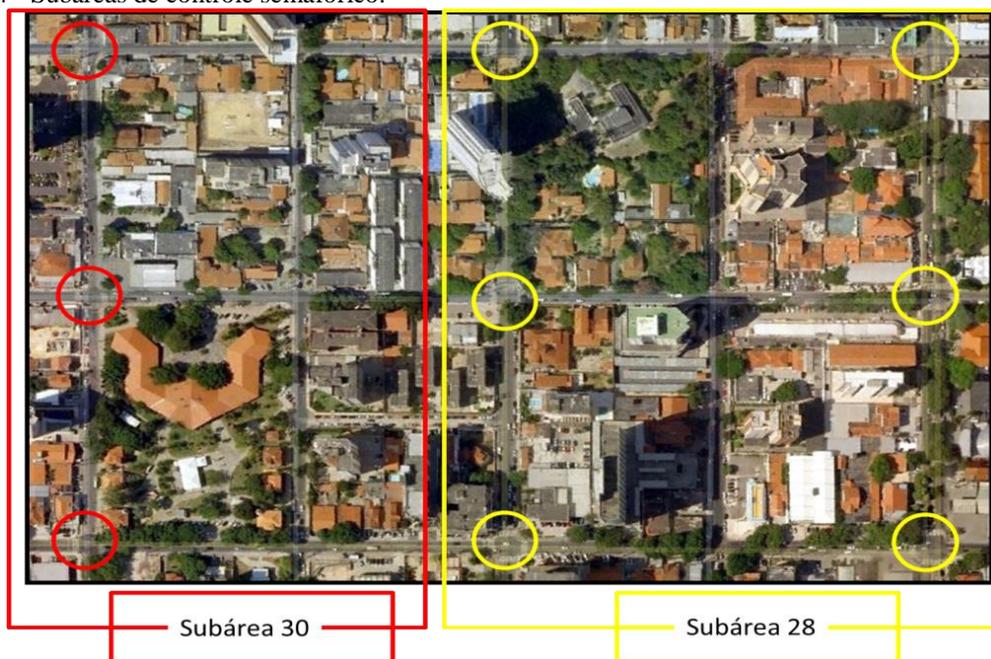
Conforme exposto por MAIA (2007), para a obtenção da matriz OD da malha naquela época, foi realizada uma pesquisa de coleta de placas das 17:00 h às 19:00 h em um dia típico na região do estudo. Durante a realização da pesquisa, foram mobilizadas 33 pessoas, sendo 3 supervisores e 15 duplas, sendo cada dupla alocada em uma interseção da malha viária. Foram coletadas as placas dos veículos de cor prata que correspondem a aproximadamente 25% da frota, segundo os dados do Departamento de Trânsito do Estado do Ceará (DETRAN-CE). Durante a pesquisa, foram registrados os intervalos de 5 minutos, com o intuito de identificar a matriz referente ao período modelado, de 17:15 h às 18:15 h.

A extensão do arquivo que o VISSIM exige para reconhecer a matriz OD é diferente do formato em que se encontrava essa matriz OD disponível, sendo necessário criar uma macro desenvolvida em *Visual Basic Advanced* (VBA) para facilitar a mudança dos dados para o formato reconhecido pelo simulador. Foram formadas matrizes agregadas em tempos de 15 minutos, bem como criada uma matriz referente ao tempo total na qual foram somados todos os volumes das matrizes de 15 minutos, incluindo nesta, o tempo de *warm-up* utilizado na simulação que também foi de 15 minutos, obtendo como produto final, um arquivo de texto que contém a matriz de 1 hora e 15 minutos, com extensão ‘.fma’, extensão exigida pelo VISSIM. Essa matriz possui 42 zonas e um total de 10333 viagens. A Figura 4.2 mostra parte da matriz já no formato compatível com o simulador utilizado.





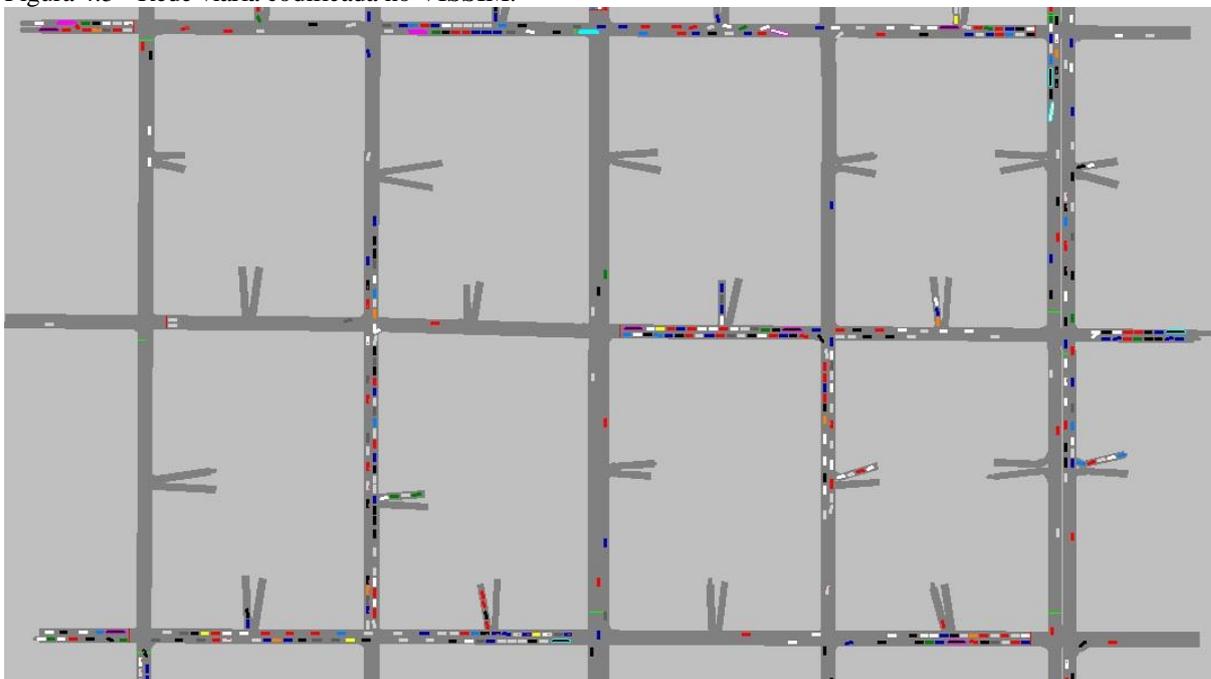
Figura 4.4 - Subáreas de controle semafórico.



Fonte: Autor

Deve-se salientar que durante o procedimento de codificação da rede no simulador VISSIM, percebeu-se que foi necessário um esforço significativo devido à grande quantidade de informações requeridas, contudo constatou-se uma grande facilidade nos momentos em que foi preciso realizar alterações de dados já inclusos. O produto final desta fase foi uma rede codificada pronta à permitir o início das simulações, conforme mostra a Figura 4.5.

Figura 4.5 - Rede viária codificada no VISSIM.



Fonte: Autor

#### 4.1.6 Realização das execuções com os parâmetros *default*

Antes de se executar as simulações, foi necessário rodar o modelo de alocação de tráfego do VISSIM. A alocação é feita de forma iterativa, ou seja, os usuários escolhem suas rotas com base nos custos de viagem experimentados nas iterações anteriores. O manual do software chama o modelo de alocação *Dynamic Assignment*, mas trata-se na realidade de uma alocação do tipo equilíbrio estocástico do usuário (Fellendorf e Vortisch, 2010). Ao realizar essas iterações o simulador guarda, num banco de dados crescente, todas as informações de custo para que sejam utilizadas nas execuções seguintes buscando um equilíbrio na rede. É necessário estipular um ou mais critérios de convergência para só a partir daí, o usuário iniciar a coleta dos dados simulados. Neste caso, inicialmente foi utilizado como critério de convergência a diferença dos tempos de viagem entre os pares OD de uma simulação para outra. Estipulou-se o valor fixo de 100 simulações e utilizou-se o valor de 30% para o critério de convergência no sentido de observar o comportamento das simulações e percebeu-se que a rede convergiu, ou seja, chegou a um ponto de equilíbrio no qual os tempos de viagens entre os pares OD não variavam durante as simulações mais do que a porcentagem pré-definida. Após essas primeiras iterações, foram realizadas outras, mas sempre diminuindo o valor percentual do critério de convergência acima citado, para 25%, 20%, até que se conseguiu convergir com o valor de 15% em apenas de 6 execuções.

Após a rede estar equilibrada conforme o critério escolhido é necessário informar ao simulador que seja criada rotas estáticas, o que faz com que o VISSIM desmarque automaticamente a opção de atribuição dinâmica do tráfego e utilize a última configuração de rotas baseadas nos custos das várias iterações executadas anteriormente. Nesse momento, é possível limitar ou não o número de rotas entre cada par OD a serem consideradas dentre as várias encontradas. Para esse estudo, optou-se por limitar o número de rotas em, no máximo, três, pois é um número satisfatório para a malha em questão. Ainda nesta etapa foi realizada uma avaliação das rotas escolhidas pelos condutores objetivando verificar se o *software* estava modelando corretamente esse processo de escolha. Com isso, foi possível perceber que os 3 melhores caminhos dentre todos os possíveis encontrados pelo simulador realmente são condizentes com a realidade modelada, ou seja, esses 3 caminhos tidos como melhores rotas entre um determinado par OD na rede, no campo são os mais utilizados, bem como, na melhor das 3 rotas, o VISSIM alocou o maior fluxo de veículos conforme já era esperado.

Nas primeiras execuções, após a convergência da rede e da análise das rotas, utilizando os valores *default* dos parâmetros do simulador obteve-se um erro médio absoluto da ordem de 29% entre os valores dos tempos de viagens fornecidos pela simulação e os de campo. Ao avaliar cada valor individualmente, percebeu-se que a maioria dos tempos de viagem simulados eram menores que os valores observados. Cogitou-se que talvez o motivo de tal discrepância fosse a falta de impedâncias na rede, como por exemplo, a representação do transporte coletivo que, inicialmente, não estava inserido na simulação ou até mesmo a brecha crítica, que até então estava com o valor *default* de 3 segundos.

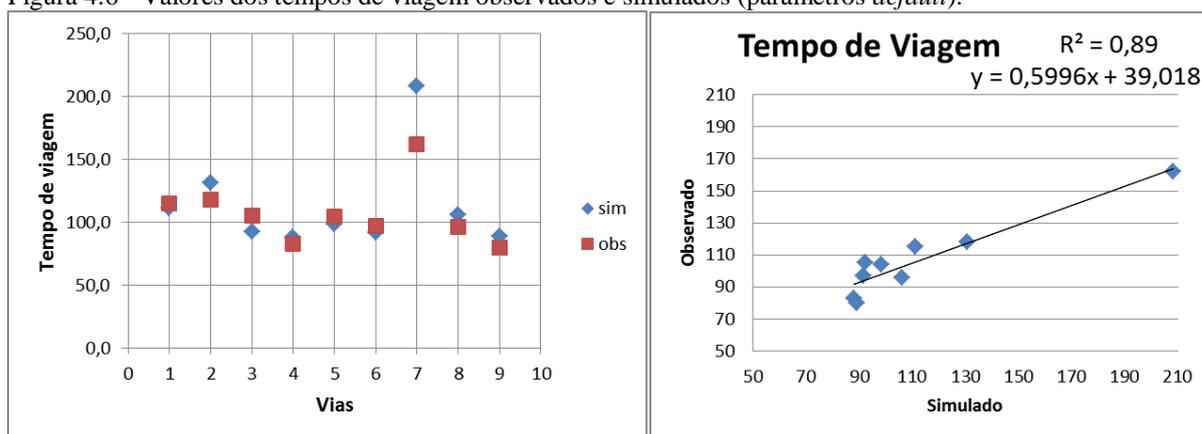
Para resolver esse problema foi necessário buscar os dados relativos as linhas de ônibus que circulavam na malha em estudo naquela época, bem com os *headways* dos coletivos, localização dos pontos de parada e itinerários, dados que foram cedidos pela ETUFOR. Foram inseridas regras de prioridade nas interseções não-semaforizadas e modificado o valor *default* da brecha crítica no VISSIM para 4,5 segundos, que é um valor já conhecido em estudos realizados por MAIA (2007) na área a ser modelada. Nas análises das simulações realizadas após essas alterações, percebeu-se que o erro proporcional absoluto médio foi reduzido para aproximadamente 10% entre os valores observados e simulados utilizando os valores *default* dos parâmetros de *car-following* e *lane-change* e criou-se a Tabela 4.1 e a Figura 4.6, que mostram os resultados para a replicação que atingiu o menor valor de MAPE (10%).

Tabela 4.1 - Erro entre os valores observados e simulados para o mínimo valor de MAPE (parâmetros *default*).

	<b>VIAS</b>	<b>Tempo de Viagem Simulado(seg)</b>	<b>Tempo de Viagem Observado(seg)</b>	<b>Erro</b>
1	Av.Pereira Filgueiras	111,1	115	<b>3%</b>
2	Av.Costa Barros	130,8	118	<b>11%</b>
3	Av.Santos Dumont	92,4	105	<b>12%</b>
4	R. Carlos Vasconcelos	88,0	83	<b>6%</b>
5	R. Monsenhor Bruno	98,2	104	<b>6%</b>
6	Av. Rui Barbosa	91,7	97	<b>5%</b>
7	R. José Lourenço	208,3	162	<b>29%</b>
8	Av. Barão de Studart (Sul)	106,0	96	<b>10%</b>
9	Av. Barão de Studart (Norte)	88,9	80	<b>11%</b>
			<b>TOTAL</b>	<b>10%</b>

Fonte: Autor

Figura 4.6 - Valores dos tempos de viagem observados e simulados (parâmetros *default*).



Fonte: Autor

Analisando a Tabela 4.1, a maioria dos valores dos erros obtidos para a medida de desempenho ficaram abaixo de 15%, um valor considerado satisfatório para essa pesquisa, exceto o valor tempo de viagem da via 7, que apresentou um erro igual a 29%. Essa discrepância já havia sido percebida nas primeiras iterações. Foi então verificado todos os elementos da codificação e regras de prioridade dessa via, bem como realizada uma verificação visual do comportamento do tráfego durante várias iterações e não foi percebido nenhuma inconsistência, o que levou a ponderar que possa ter ocorrido algum erro na etapa de coleta ou tratamento dos dados de tempo de viagem na pesquisa de MAIA (2007). Pelos gráficos de dispersão construídos, verificou-se uma alta correlação entre as variáveis atingindo um  $R^2 = 0,89$ , ou seja, os valores simulados não apresentam grandes distorções em relação aos valores coletados em campo. Apesar do valor do erro ser de apenas 10%, resolveu-se partir para calibração do simulador utilizando o AG acreditando ser possível minimizar ainda mais esse valor.

## 4.2 FASE DA CALIBRAÇÃO

### 4.2.1 Escolha dos parâmetros do simulador

Diante da escolha pela calibração do algoritmo de WIEDEMANN 99 e da análise realizada para o conhecimento individual de cada parâmetro relativo a este modelo, selecionou-se os parâmetros que seriam calibrados e definiu-se os intervalos aceitáveis para cada um, baseando-se em estudos realizados por CUNTO (2008). Os parâmetros de *car-following* e *lane-change* escolhidos são mostrados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros a serem calibrados e seus intervalos de valores.

Par	Descrição	Categoria	Default	Inferior	Superior
CC0	Standstill Distance (m)	Car following model (99)	1.50	0.50	3.00
CC1	Headway Time (s)	Car following model (99)	0.90	0.20	1.50
CC2	Following Variation (m)	Car following model (99)	4.00	1.50	6.00
CC3	Threshold for Entering Following	Car following model (99)	-8.00	-15.00	-2.00
CC4	Negative Following Threshold	Car following model (99)	-0.35	-2.00	-0.10
CC5	Positive Following Threshold	Car following model (99)	0.35	0.10	2.00
CC6	Speed Dependency of Oscillation	Car following model (99)	11.44	2.00	20.00
MH	Min. Headway - front/rear (m)	Lane change	0.50	0.50	2.00
SD	Safety Distance Reduction Factor	Lane change	0.60	0.20	0.80
MD	Max. Deceleration For Cooperative Braking (m/s <sup>2</sup> )	Lane change	-3.00	-9.00	-4.00

Fonte: Autor

Os parâmetros de *car-following* CC7, CC8 e CC9 disponíveis para calibração, conforme já especificados no capítulo 2, estão diretamente ligados à aceleração dos veículos e foram mantidos com os seus valores *default* por não serem considerados relevantes para a modelagem do comportamento do tráfego na região selecionada para o estudo.

#### 4.2.2 Configuração do AG

Como já se sabe, o AG utiliza uma função de ajuste (*fitness*) para avaliar a qualidade dos resultados obtidos através das execuções. A função selecionada foi o erro médio absoluto proporcional (MAPE):

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|O_i - E_i|}{O_i}$$

Onde:

$O_i$  representa a medida de desempenho observada no campo;

$E_i$  representa a medida de desempenho estimada pelo modelo e;

N representa o número de observações.

Conforme já relatado, os valores dos parâmetros de controle e operadores genéticos afetam diretamente o desempenho dos AG's. Portanto, com a função de ajuste já definida e objetivando encontrar os valores dos parâmetros e operadores do AG que fossem ideais para esta pesquisa, foi realizada uma revisão em estudos que utilizaram este método de otimização para calibração de microssimuladores, bem como, a realização de uma minuciosa análise de sensibilidade desses parâmetros.

Antes de iniciar as execuções do AG, resolveu-se simular a rede por 30 vezes com os parâmetros *default* modificando somente as sementes aleatórias das simulações para analisar o efeito das replicações na variabilidade dos resultados fornecidos pelo simulador. Após essas replicações a amostra do MAPE teve média = 12,8%, desvio padrão = 1%, valor mínimo = 10,0% e valor máximo = 14,5%. Diante desses resultados, percebeu-se que não há uma grande variação nas saídas do simulador, o que levou a optar por utilizar somente uma replicação durante o processo de calibração. Ainda assim, avaliou-se dois cenários com os valores dos parâmetros do AG apresentados na Tabela 4.3.

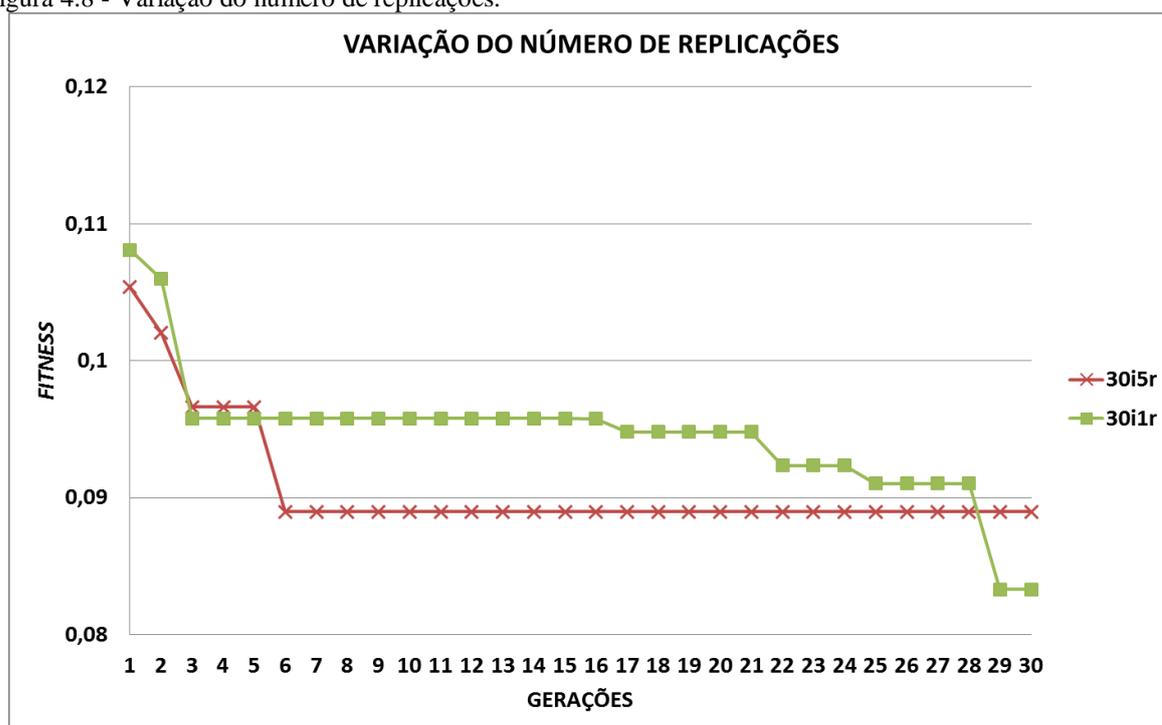
Tabela 4.3 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e replicações.

<b>PARÂMETROS DO AG</b>	
<b>Número de indivíduos</b>	30
<b>Número de gerações</b>	30
<b>Replicações</b>	1 e 5
<b>Diversidade</b>	2
<b>Taxa de mutação</b>	30%
<b>Taxa de predação</b>	20%

Fonte: Autor.

Nesses primeiros cenários, variou-se o número de replicações, e foi construído o gráfico apresentado na Figura 4.8, onde foi possível observar que o comportamento do algoritmo foi melhor quando utilizou-se um menor número de replicações. Sendo assim, determinou-se que seria realizada somente 1 replicação para cada indivíduo. A escolha para o valor do número de replicações igual a 1, diminuiu consideravelmente o tempo despendido nas simulações.

Figura 4.8 - Variação do número de replicações.



Fonte: Autor

Após a realização das análises das simulações que permitiram a escolha por um número menor de replicações, executou-se a simulação de 4 cenários, variando-se 2 fatores em 2 níveis, o número de indivíduos e o intervalo de gerações para serem aplicados os operadores genéticos (diversidade) de acordo com a Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e diversidade.

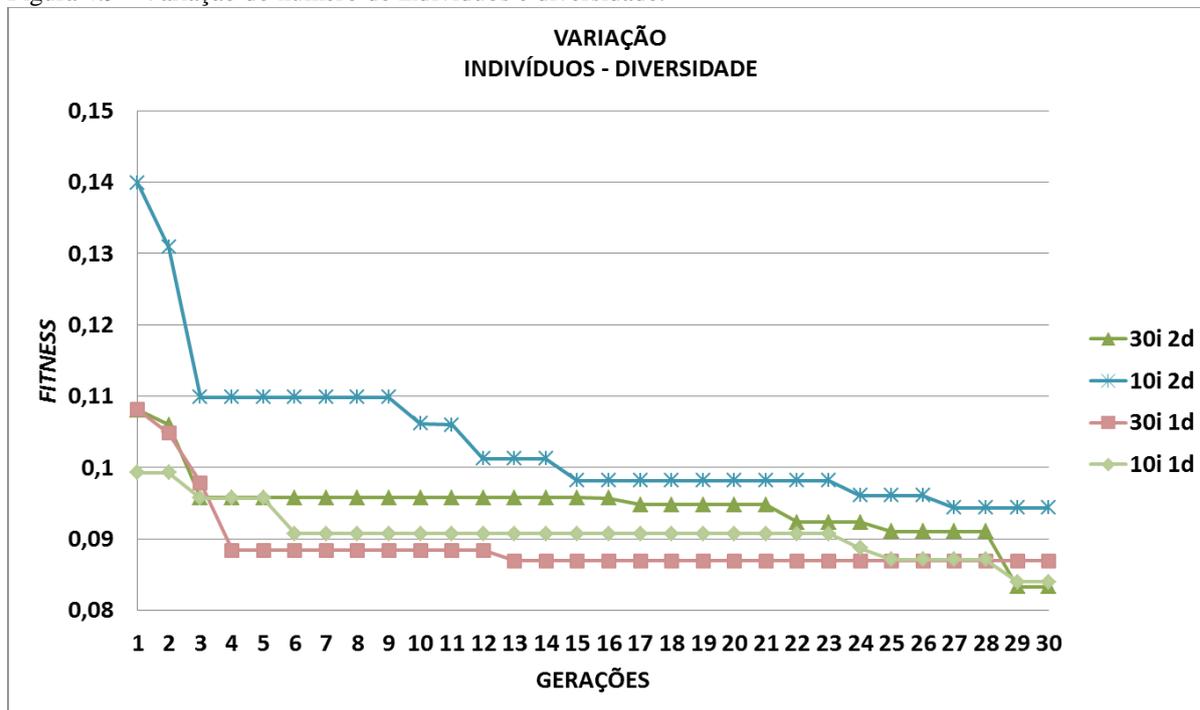
<b>PARÂMETROS DO AG</b>	
<b>Número de indivíduos</b>	10 e 30
<b>Número de gerações</b>	30
<b>Replicações</b>	1
<b>Diversidade</b>	1 e 2
<b>Taxa de mutação</b>	30%
<b>Taxa de predação</b>	20%

Fonte: Autor.

O algoritmo se mostrou razoavelmente melhor com um maior número de indivíduos. Percebeu-se também que inserindo diversidade a cada 2 gerações, foi possível atingir um erro relativamente menor comparado aos erros gerados nos outros cenários. Esse resultado já era, de certa forma, esperado, pois como relatado anteriormente, a orientação é

que os operadores genéticos sejam aplicados em gerações não subsequentes para que o efeito destes sejam assimilados pela população. O que foi comprovado pela Figura 4.9.

Figura 4.9 - Variação do número de indivíduos e diversidade.



Fonte: Autor

Continuando a busca pelo melhor conjunto de parâmetros do AG para utilizar nesta pesquisa, fixou-se a diversidade em 2 e variou-se as taxa de mutação e novamente, o número de indivíduos, conforme Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Parâmetros do AG – Variação de indivíduos e taxa de mutação.

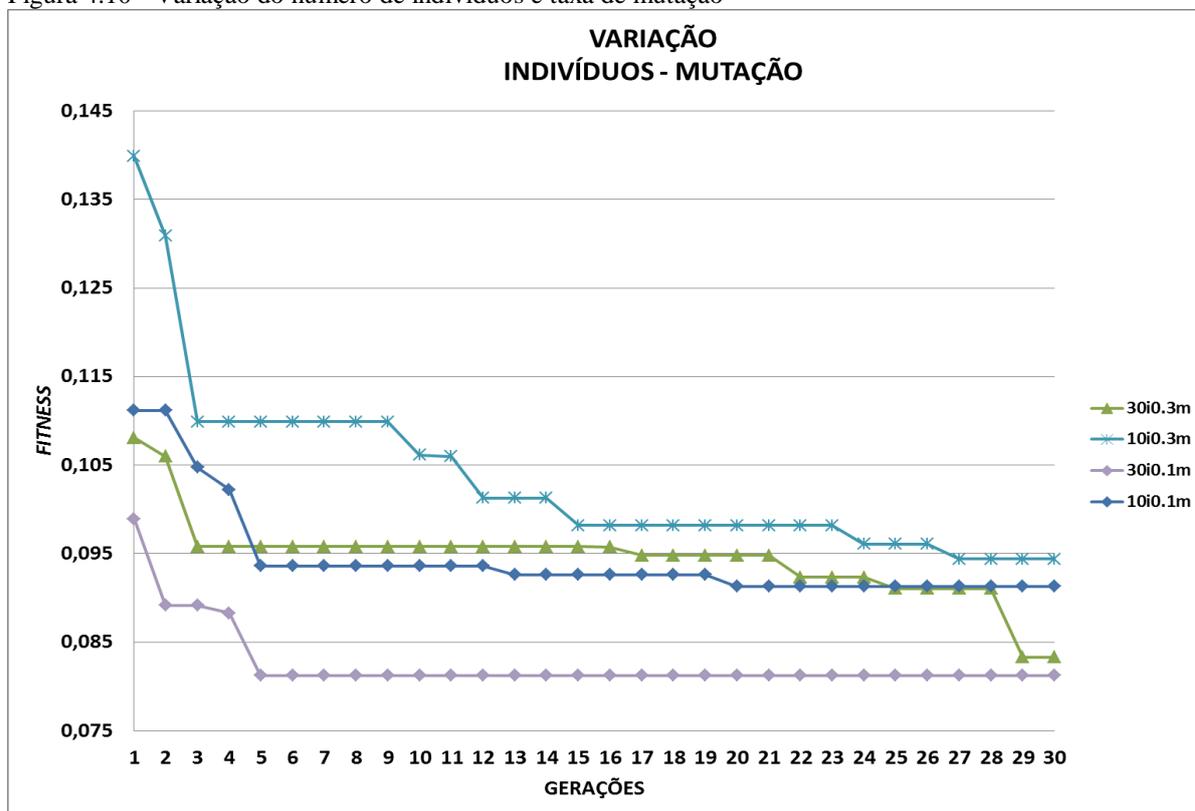
<b>PARÂMETROS DO AG</b>	
<b>Número de Indivíduos</b>	<b>10 e 30</b>
<b>Número de gerações</b>	<b>30</b>
<b>Replicações</b>	<b>1</b>
<b>Diversidade</b>	<b>2</b>
<b>Taxa de mutação</b>	<b>30% e 10%</b>
<b>Taxa de predação</b>	<b>20%</b>

Fonte: Autor.

De acordo com a Figura 4.10, a melhor convergência se deu utilizando o maior número de indivíduos e a menor taxa de mutação. Um baixo valor da taxa de mutação previne uma convergência prematura, porém prejudica a busca por uma solução ótima global, pois

não permite ao algoritmo explorar todo o intervalo das soluções aceitáveis. Mesmo assim, neste caso, o valor da taxa de mutação fixado em 10% garantiu uma melhor solução para o problema em questão.

Figura 4.10 - Variação do número de indivíduos e taxa de mutação



Fonte: Autor

Ao fim de todas essas análises, os valores dos parâmetros de controle e dos operadores genéticos do algoritmo utilizado nesta pesquisa estão descritos na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Melhores parâmetros do AG para esta pesquisa.

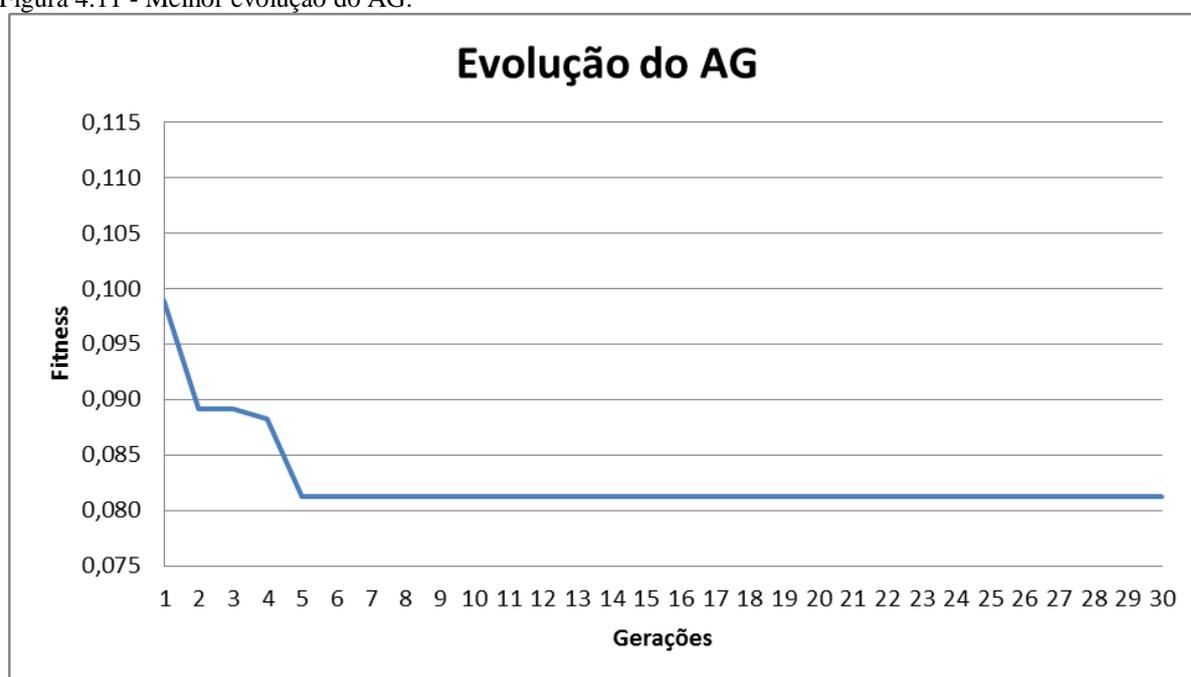
PARÂMETROS DO AG	
Número de indivíduos	30
Número de gerações	30
Replicações	1
Diversidade	2
Taxa de mutação	10%
Taxa de predação	20%

Fonte: Autor.

### 4.2.3 Execução do AG

De posse da melhor configuração do algoritmo genético utilizado nessa pesquisa realizou-se mais uma vez a execução do AG e observou-se o comportamento mostrado na Figura 4.11.

Figura 4.11 - Melhor evolução do AG.

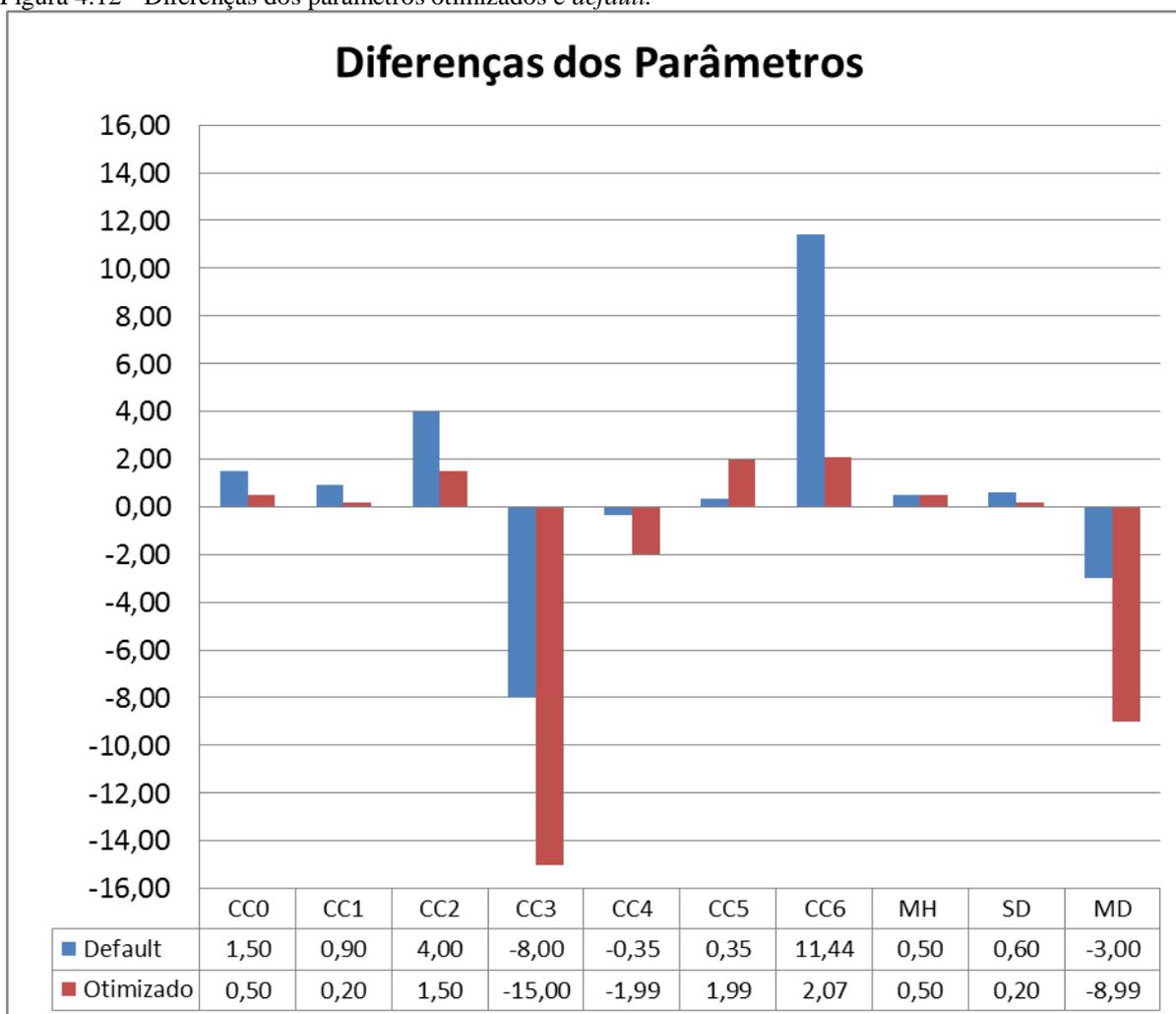


Fonte: Autor

Notou-se que o algoritmo convergiu para um valor de erro de aproximadamente 8% em apenas 5 gerações. É importante notar que em todas as configurações analisadas, o algoritmo convergiu a partir da 12ª geração para valores de erro similares aos da 30ª geração, os quais ficaram entre 8,1% e 9,5%, valores considerados próximos.

### 4.2.4 Análise do melhor indivíduo

Ao término de todas as simulações realizadas pelo AG nas etapas anteriores, foi possível identificar o melhor indivíduo do melhor cenário, ou seja, o melhor conjunto de valores dos parâmetros escolhidos para serem calibrados. A diferença entre os valores dos parâmetros *default* e os valores otimizados pelo algoritmo, é mostrada na Figura 4.12.

Figura 4.12 - Diferenças dos parâmetros otimizados e *default*.

Fonte: Autor

Dos 10 parâmetros selecionados para a calibração, três de *car-following* apresentaram grande variação quando comparados aos seus valores *default*, foram eles: os parâmetros CC4 e CC5 que possuem valores iguais em módulo e o parâmetro CC6.

O parâmetro CC0 indica a distância desejada que os condutores mantem um do outro quando estão parados. O valor *default* desse parâmetro é 1,5 metros, um valor 3 vezes maior do que o valor obtido na otimização. Visto que esse parâmetro faz parte do modelo desenvolvido para rodovias onde os veículos mantem uma distância maior entre eles, era esperado que ocorresse uma diminuição no valor otimizado, pois em redes viárias urbanas os veículos tendem a manter um menor distanciamento entre si e no horário de pico isso é bem mais notável. Isto também corrobora com a hipótese de que, ao entrar em fila, os motoristas da área estudada parecem deixar menores distâncias para o veículo da frente do que o motorista da realidade *default* encontrada no software.

Como o parâmetro CC1 é o coeficiente da velocidade no cálculo da distância de segurança ( $D_s$ ), distância essa que é calculada da seguinte forma:  $D_s = CC0 + CC1 * \text{velocidade (m/s)}$  e é definida como a distância que os condutores desejam manter entre si quando estão em movimento, o valor otimizado de 0,20 segundos gera uma  $D_s$  de 2,7 metros. Pode-se entender que quanto menor for o valor de CC1, mais agressivo é o comportamento do condutor, logo o valor atingido para esse parâmetro é condizente com a realidade em questão.

Ao observar o valor *default* do parâmetro CC2, realmente era esperado que esse valor fosse diminuído durante o processo de calibração, pois esse parâmetro é responsável pelo valor do espaçamento além da  $D_s$  quando um veículo se aproxima do carro à frente, ou seja, ele limita a oscilação da  $D_s$ . O valor obtido de CC2 somado a  $D_s$  resulta numa distância máxima igual a 4 metros.

O parâmetro CC3 controla o início do processo de desaceleração, ou seja, o momento que o condutor reconhece um veículo mais lento à frente. Como os veículos trafegam a pequenas distâncias, a percepção de quando se deve iniciar o processo de frenagem acontece de forma mais eficaz, justificando o baixo valor obtido na calibração.

Os parâmetros CC4 e CC5 são adimensionais e a literatura (PTV, 2010) recomenda que sejam iguais em módulo. Eles exercem influência direta no movimento de aproximação dos veículos, pois representam os limites de diferenças entre as velocidades acima dos quais o veículo seguidor reagirá para se manter no processo de *following*. Um baixo valor para o parâmetro CC4 indica que os veículos estão trafegando mais próximos uns dos outros e conseqüentemente a percepção dos condutores em relação à aceleração ou desaceleração do veículo líder é mais aguçada, fato esse percebido nas vias urbanas devido aos congestionamentos, justificando os valores obtidos.

O parâmetro CC6, mede a influência da distância ao veículo líder na velocidade de oscilação quando no processo de *following*. Se este valor for definido como zero, significa que as oscilações de velocidade independem da distância do veículo à frente. Logo, valores maiores levam a uma maior oscilação da velocidade com uma distância cada vez maior. Nesse caso o valor otimizado foi mais baixo que o *default*, o que permite concluir que as velocidades não oscilam tanto, bem como, a distância em relação ao veículo líder não é tão grande, realidade esta percebida no comportamento de condução na malha viária estudada no horário simulado.

Analisando o parâmetro MH que define a distância mínima para a realização de uma mudança de faixas estando os veículos parados, como é o caso nas filas formadas devido aos congestionamentos na malha em estudo, percebeu-se que não houve variação no valor inicial de 0,5 metros. Esse valor corresponde ao valor mínimo do intervalo aceitável para esse parâmetro.

O parâmetro SD é um fator responsável por reduzir a distância de segurança durante as trocas de faixas de acordo com a seguinte expressão:  $D_s$  multiplicado por SD. Após a troca ser efetivada, a  $D_s$  volta ao seu valor original. Utilizando o valor otimizado para o parâmetro SD e considerando o valor da  $D_s$  obtida com os valores otimizados dos parâmetros envolvidos, a distância mínima é reduzida para cerca de 0,55 metros, valor este considerado baixo porém aceitável para as condições em questão.

O parâmetro MD define se o veículo que está na faixa desejada por um determinado condutor inicia uma frenagem cooperativa de modo a permitir que outro veículo consiga realizar a mudança para a sua faixa. Um valor mais elevado desse parâmetro aumenta a probabilidade de mudança de faixa. O valor otimizado foi bem abaixo do valor *default*, mostrando que realmente a cooperação por parte dos condutores no processo de mudança de faixa é menor, ou seja, realizar a mudança de faixa na área simulada não é tão fácil, sendo isso compreensível, tendo em vista que o horário simulado foi o do pico da tarde.

Com essas análises, foi possível perceber que sinal das diferenças entre os valores dos parâmetros otimizados pelo AG e os valores *default* estão bem condizentes com o esperado.

### **4.3 FASE DA VALIDAÇÃO**

#### **4.3.1 Processo de validação da rede microsimulada**

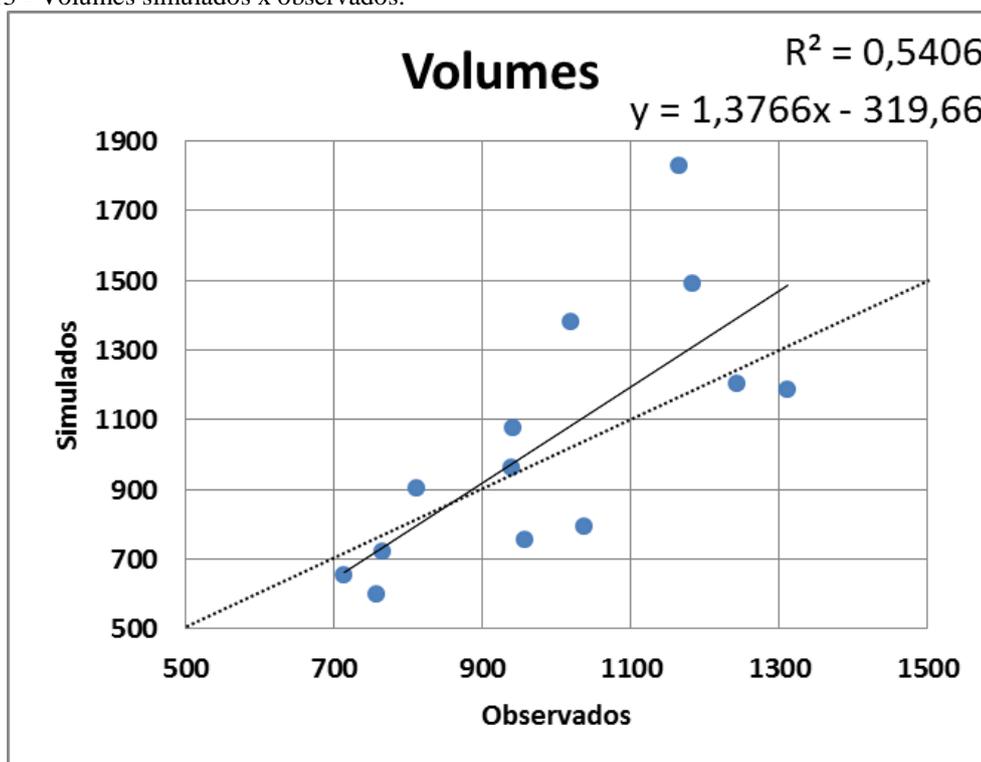
A etapa de validação foi baseada no procedimento realizado na pesquisa de MAIA (2007). Este autor realizou um esforço de calibração e validação de um meso e um microsimulador de tráfego na mesma malha viária utilizada nessa pesquisa.

De posse dos mesmos dados utilizados para o processo de validação na proposta do autor anteriormente citado, que se trata de um conjunto de tempos de viagem e volumes nos arcos, coletados no período do pico da tarde de dias típicos entre os meses de abril e junho

de 2006, foi necessário inserir mais 13 pontos de coleta na rede com o intuito de verificar o fluxo veicular, bem como, os tempos de viagem nos arcos da malha simulada onde existem laços detectores do SCOOT, dados estes agregados em intervalos de 15 minutos. Assim, a medida de desempenho é mais desagregada espacial e temporalmente do que na fase de calibração, o que é desejável, uma vez que na análise de validação a comparação dos valores observados e simulados deve ser mais rigorosa do que na fase de calibração. Além disso, a estimação destas variáveis desagregadas exige do modelo maior capacidade de representação do comportamento do tráfego na rede.

A Figura 4.13 mostra a comparação dos volumes nos arcos com laços detectores e os simulados pelo VISSIM. Para os valores obtidos, o MAPE foi de 18% e no geral, o simulador tendeu levemente a superestimar os volumes nos arcos. Já na utilização do microssimulador por MAIA (2007), conduziu a subestimação dos volumes e o valor do  $R^2$  obtido por ele foi de 0,36. Enquanto que o valor do coeficiente  $R^2$  na comparação dos volumes nessa pesquisa foi de 0,54.

Figura 4.13 - Volumes simulados x observados.

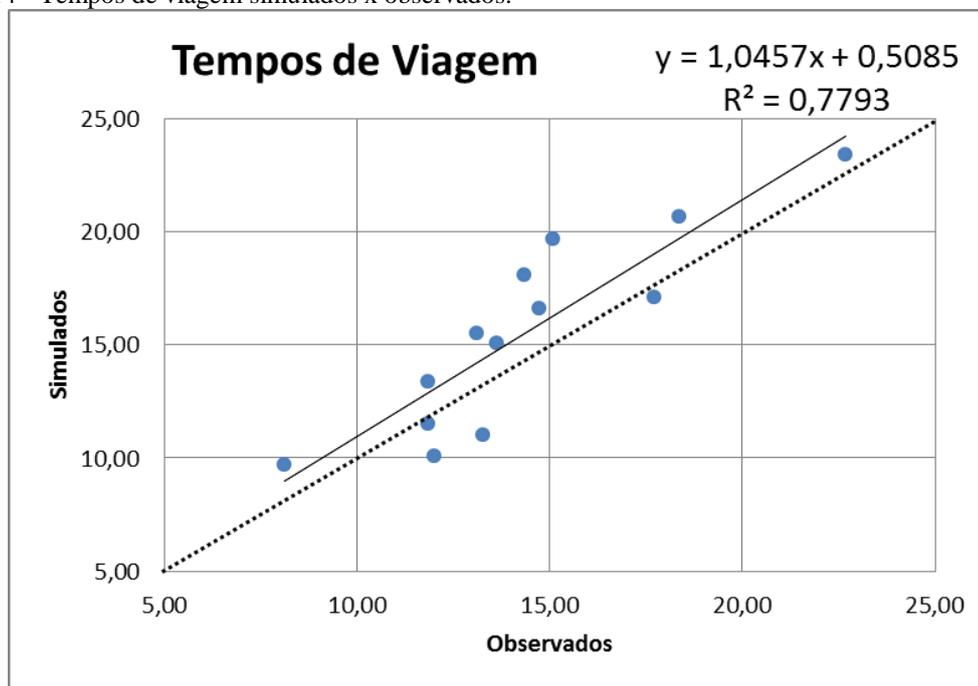


Fonte: Autor

Na comparação dos tempos de viagem simulados com os coletados em campo, gerou-se o gráfico mostrado na Figura 4.14. Analisando o gráfico abaixo, foi possível concluir

que os valores simulados ficaram bem próximos dos observados, gerando um MAPE de 13% e com uma leve superestimação dos tempos de viagem pelo simulador. O valor do coeficiente  $R^2$  foi de 0,77, valor este, considerado bastante satisfatório.

Figura 4.14 - Tempos de viagem simulados x observados.



Fonte: Autor

MAIA (2007) relatou que em seu trabalho os tempos de viagem simulados, na maioria dos arcos semaforizados da rede, foram menores do que os observados em campo. Nesse caso o resultado obtido por ele, foi distinto do resultado obtido pelo método ora aplicado. O valor do  $R^2$  obtido foi igual a 0,15.

Por fim, vale ressaltar o fato de na validação ter sido utilizada duas medidas de desempenho diferentes daquela utilizada na calibração. As medidas de desempenho da validação, como já dito, são referentes aos *links* internos da rede, portanto são mais desagregadas e exigem do modelo a capacidade de representar o comportamento da rede de forma mais detalhada.

Ao final da pesquisa realizada por MAIA (2007), o autor chegou à conclusão de que os resultados obtidos na simulação utilizando o microssimulador INTEGRATION mostraram que na maioria dos arcos semaforizados os tempos de viagem e os volumes nos arcos foram significativamente subestimados. A partir desse resultado MAIA (2007) concluiu que o modelo microscópico calibrado não foi capaz de representar adequadamente a malha

viária e uma das recomendações feitas pelo autor é que técnicas mais eficientes de otimização dos parâmetros de calibração, como por exemplo, algoritmos genéticos devem garantir resultados mais satisfatórios num contexto de uma rede viária urbana microssimulada. Essa recomendação foi o principal motivo pelo qual optou-se por comparar os resultados da validação dessa pesquisa com os da validação realizada por ele.

Diante dos resultados mostrados aqui, fica claro que a rede de microssimulação modelou satisfatoriamente os tempos de viagem médios nos arcos. Para a variável fluxo, percebe-se que há uma tendência a superestimação à medida que o fluxo aumenta. Uma possível causa para isto é a limitação do sistema SCOOT na estimação desta variável para períodos de congestionamento, pois o sistema perde qualidade de estimação quando a fila de veículos se estende para além do laço detector. Contudo, foi possível calibrar satisfatoriamente redes urbanas microssimuladas utilizando um método automatizado conforme relatado pelo citado autor.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 CONCLUSÕES DA PESQUISA

Nos últimos anos percebe-se um aumento nos esforços despendidos pelas comunidades, técnica e científica, no sentido de melhorar a situação do tráfego nas grandes cidades brasileiras. Diante disso, diversas técnicas de análise são utilizadas com o objetivo de avaliar as condições atuais das malhas viárias e conseguir, de modo eficaz, aumentar a fluidez e a segurança do tráfego. Dentre as técnicas utilizadas, a simulação computacional aparece como uma das mais eficientes, pois permite representar os vários elementos do sistema viário e assim, estimar o comportamento provável do tráfego sem a necessidade de intervenções na malha em estudo. Porém, ao se escolher utilizar um simulador computacional é necessário ajustar os seus parâmetros, para que o mesmo possa representar de forma satisfatória a realidade local. Com o aumento da capacidade de representação dos simuladores tornou-se indispensável o uso de métodos computacionais de otimização que garantam de forma eficaz a calibração de uma maior quantidade de parâmetros. Diante desse contexto, definiu-se como objetivo geral dessa pesquisa, verificar a aplicabilidade de algoritmos genéticos na calibração de modelos de microssimulação do tráfego veicular em malhas viárias urbanas brasileiras.

No desenvolvimento dessa pesquisa realizou-se uma ampla revisão bibliográfica acerca das metodologias e procedimentos propostos para a calibração de simuladores de tráfego no nível microscópico. Essa revisão permitiu concluir que, apesar de existirem muitos trabalhos propondo métodos de calibração e validação de microssimuladores de tráfego, a maioria não traz um procedimento bem detalhado e poucos são adaptáveis às malhas viárias urbanas brasileiras. Vale também salientar que a grande parte das propostas possuem complexidades que desencorajam a utilização da microssimulação pela comunidade técnica.

Ainda na etapa de revisão, pesquisou-se sobre as principais plataformas computacionais destinadas a realização da modelagem microscópica do tráfego. Dentre as disponíveis no mercado, o VISSIM, foi utilizado nos mais diversos estudos publicados nos últimos 15 anos, e por várias vezes tem sido reconhecido como um dos melhores microssimuladores do tráfego urbano. Os resultados dessa pesquisa mostram que realmente esse simulador é capaz de modelar de forma satisfatória o comportamento do tráfego em

malhas viárias urbanas brasileiras. Porém, vale ressaltar um ponto negativo na escolha desse simulador, o manual do usuário deveria ser mais detalhado e apresentado de forma mais didática.

Após a decisão de se utilizar o VISSIM, procurou-se conhecer os submodelos que compõe esse simulador, particularmente, os de *car-following* e de *lane-change*. Ao analisar os dois modelos de *car-following* disponíveis, optou-se por utilizar o WIEDEMANN 99, mesmo sabendo que este é mais complexo, contém um maior número de parâmetros a serem calibrados e segundo o manual do VISSIM, é mais indicado para representação dos movimentos dos veículos em rodovias. Essa escolha se deu por acreditar que este seja capaz de representar mais fielmente a realidade do sistema viário em questão e devido os parâmetros contidos nesse modelo englobar todos os de WIEDEMANN 74, que é citado no mesmo manual como sendo o ideal para áreas urbanas. O aumento no número de parâmetros a serem calibrados diante da escolha pelo modelo WIEDEMANN 99, foi de certa forma, compensado pela escolha de um método de otimização automatizado, que facilita bastante esse processo.

A literatura aponta que os algoritmos genéticos têm sido bastante utilizados para a calibração de microssimuladores de tráfego. Esses métodos de otimização podem ser desenvolvidos nas mais diversas linguagens computacionais, facilitando a sua implementação. Uma dificuldade a ser considerada na utilização desses algoritmos é a definição dos parâmetros de controle e dos operadores genéticos, pois a literatura é enfática ao dizer que não existe uma configuração que seja aplicável a qualquer tipo de cenário, tornando sempre necessário a busca por um conjunto de valores dependentes do problema em questão. Diante do exposto, nessa pesquisa realizou-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros do algoritmo e foi possível conseguir uma configuração que permitiu obter uma solução bastante satisfatória na busca pelo melhor conjunto de parâmetros do simulador. É importante lembrar que os efeitos decorrentes da escolha inadequada desses parâmetros vão desde aumento no tempo de convergência, convergência prematura, estagnação da busca, maior necessidade de recursos computacionais até a não-convergência para uma solução viável.

Como última etapa dessa pesquisa, foi realizada a validação da rede calibrada baseando-se no procedimento desenvolvido por MAIA (2007). Na validação, os resultados obtidos também foram bastante satisfatórios. Quando comparados com os resultados de MAIA (2007), pode-se perceber uma evolução no processo de modelagem, pois como já relatado, o citado autor não conseguiu bons resultados ao tentar calibrar o microssimulador

INTEGRATION para a mesma malha viária utilizada em sua pesquisa. Porém, vale ressaltar que MAIA (2007) avaliou seu modelo para uma área maior do que a que foi utilizada para calibração, e que apenas dois parâmetros do software foram calibrados. Portanto, é preciso condicionar a comparação dos resultados dos dois estudos a estas diferenças.

Enfim, para essa pesquisa, o método de calibração utilizando algoritmos genéticos mostrou-se bastante eficiente considerando os resultados atingidos no estudo de caso realizado numa área bastante adensada da cidade de Fortaleza/CE. Vale salientar que acredita-se que a metodologia aqui aplicada, bem como os valores encontrados para os parâmetros de controle e operadores genéticos podem ser utilizados em outras malhas viárias urbanas brasileiras, desde que esta apresente características semelhante as da malha viária aqui simulada.

## **5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

A pesquisa aqui apresentada foi um ponto de partida para se avaliar a aplicabilidade de AG para redes urbanas como as encontradas no Brasil. Outros estudos devem ser realizados com o mesmo objetivo. Como recomendação para trabalhos futuros, propõe-se:

- Aplicar a metodologia para uma malha urbana de maior porte com características similares às encontradas no estudo de caso desta pesquisa;
- Aplicar a metodologia utilizada em outras malhas viárias urbanas das grandes cidades brasileiras;
- Coletar em campo os valores dos parâmetros do simulador, quando observáveis, e compará-los com os valores calibrados;
- Aplicar a metodologia aqui empregada para a calibração de redes desenvolvidas em outros importantes simuladores, como o Aimsun e o Transmodeler;
- Realizar uma análise de sensibilidade mais abrangente acerca dos parâmetros de controle e operadores genéticos;
- Comparar a aplicabilidade dos AG's com outros métodos de otimização;

- Implementar metodologias de calibração e validação do modelo de alocação do tráfego.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMBADIPUDI, R., DOROTHY, P. E KILL, R. (2006) Development and Validation of Large-Scale Microscopic Models. Proceedings of the 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., CD-ROM.
- BARCELÓ, J. (2010) Fundamentals Traffic Simulations. International Series in Operations Research & Management Science, v.145, Ed. Springer.
- BESSA JR e SETTI, J. R. (2012) Relações Fluxo-Velocidade para Rodovias de Pista Simples no Brasil. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET.
- BESSA JR., J. E. (2009) Produção de Dados de Tráfego Sintéticos Através de Algoritmo Genético e Simulação Microscópica. EESC-USP, São Carlos – São Paulo.
- BESSA JR., J. E. (2010) Algoritmo Genético para Calibração do Modelo de Simulação VISSIM. EESC-USP, São Carlos – São Paulo.
- BESSA JR., J. E., LIMA, F. A. A., CUNHA, A. L. B. N. e SETTI, J. R. (2008) Calibração do Modelo de Desempenho do Simulador INTEGRATION Através de um Algoritmo Genético. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – ANPET.
- BESSA JR., J.; CUNHA, A. L. e SETTI, J. R. (2009) Genetic Algorithm for the Calibration of Vehicle Performance Models of Microscopic Traffic Simulators. Dept. of Transport Engineering, São Carlos School of Engineering, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brazil.
- CUNHA, A. L. B. N. e J. R. SETTI (2006) Calibração do Modelo de Desempenho de Caminhões do CORSIM através de um Algoritmo Genético. Anais do XX Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Brasília-DF, CD-ROM.
- CUNTO, F. J. C. (2008) Assessing Safety Performance of Transportation Systems using Microscopic Simulation Tese de Doutorado, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo, Ontário, Canadá.
- CUNTO, F. J. C. e C. F. G LOUREIRO (2011) O Uso da Microssimulação na Avaliação do Desempenho da Segurança Viária. Transporte em transformação XV: trabalhos vencedores do prêmio CNT de Produção Acadêmica 2010, Confederação Nacional do Transporte, Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, Brasília, p. 216.
- DALORSOLETA, M. (2010) Algoritmos Genéticos. Infosep em Revista – 1ª Edição, p.18.
- EGAMI, C. Y. (2006) Adaptação do HCM-2000 para Determinação do Nível de Serviço em Rodovias de Pista Simples Sem Faixas Adicionais no Brasil. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- EGAMI, C. Y.; SETTI, J. R.; RILETT, L. R. (2004) Algoritmo genético para calibração automática de um modelo de simulação de tráfego em rodovias de pista simples. Transportes (Rio de Janeiro), v. 12, p. 5–14.
- FELLENDORF, M. e P. VORTISCH (2001) Validation of the Microscopic Traffic Flow Model VISSIM in Different Real-World Situations. Transportation Research Board.
- FELLENDORF, M. e P. VORTISCH (2010) Microscopic Traffic Flow Simulator VISSIM. Fundamentals Traffic Simulations. International Series in Operations Research & Management Science, v.14, cap. 2, pp. 63-93 Ed. Springer.
- FHWA (2004) Traffic Analysis Toolbox Volume III: Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software. Federal Highway Administration.

- FHWA (2007) FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. Traffic Analysis Tools, vol. 6, Washington, D.C, 2007.
- GROSK, A. P.; J. R. GORSKI e J. S. DIAS (2006) Algoritmo Genético: Revisão Histórica e Exemplificação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.
- HELLINGA, B. R. (1998) Requirements for The Calibration of Traffic Simulation Models. Proceedings of the Canadian Society for Civil Engineering, v.1, p. 211-222.
- HOLLANDER, Y. e R. LIU (2008) The Principles of Calibrating Traffic Microsimulation Models. Transportation, v. 35, p. 347–362.
- HOURLAKIS, J., P. G. MICHALOPOULOS e J. KOTTOMMANNIL (2003) Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. Transportation Research Record, n. 1852, p. 130-139.
- KIM, K. e L. R. RILETT (2001) Genetic Algorithm Based Approach for Calibration Microscopic Simulation Models. IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings, Oakland, CA, USA, p. 698–704.
- LAW, A. M. e W. D. KELTON (2000) Simulation Modeling and Analysis. 3rd ed. McGraw-Hill, Boston, EUA.
- LINDEN, R. (2008) Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional. 2ª Ed. Editora Brasport. Rio de Janeiro, Brasil.
- LIU, R. (1994) DRACULA Microscopic Traffic Simulator. Institute of Transport Studies, University of Leeds, 1994.
- LIU, R. (2010) Traffic Simulation with DRACULA. Fundamentals Traffic Simulations. International Series in Operations Research & Management Science, v.14, Ed. Springer.
- MA, J.; H. DONG e H. M. ZHANG (2007) Calibration of Microsimulation with Heuristic Optimization Methods. Transportation Research Record 1999, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 208-217.
- MA, T. e B. ABDULHAI (2002) Genetic Algorithm-based Optimization Approach and Generic Tool for Calibration Traffic Microscopic Simulation Parameters. Transportation Research Record 1800, TRB, National Research Council, Washington, D.C., p. 6-15.
- MACHADO, J. P. A. (2004) Modelação e Simulação de Sistemas de Tráfego. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto.
- MAIA, F. V. B. (2007) Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 104 fl.
- MARK, C., SADEK, S. A. W., HUANG, S. (2008) Large-Scale Microscopic Simulation: Toward an Increased Resolution of Transportation Models. Journal of Transportation Engineering, Vol. 134, No. 7, July 2008, pp. 273-281.
- MAY, A. D. (1990). Traffic Flow Fundamentals. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., EUA.
- MITCHELL, M. (1997) An Introduction to Genetic Algorithms. Cambridge: Mit Press, p. 1-31, 166-178.
- OLIVEIRA, M. L. e H. B. B. CYBIS (2008) Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. VIII SEPROSUL – Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana. Bento Gonçalves, Brasil.
- PACHECO, M. A. C. (1999) Algoritmos Genéticos: Princípios e Aplicações. Laboratório de Inteligência Computacional Aplicada. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

- PARK, B. B.; H. QI (2005) Development and Evaluation of a Procedure for the Calibration of Simulation Models. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., n.1934, p. 208–217.
- PARK, B. B.; J. D. SCHNEEBERGER (2003) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation: A Case Study of VISSIM for a Coordinated Actuated Signal System. Transportation Research Record, Journal of the Transportation Research Board, No. 1856, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., p. 185–192.
- PARK, B. E. H. QI (2006) Microscopic Simulation Model Calibration and Validation for Freeway Work Zone Network – A Case Study of VISSIM. Proceedings of the 2006 IEEE ITSC Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canadá, pg. 1471-1476.
- PORTUGAL, L. S. (2005) Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem, Ed. Interciência, Rio de Janeiro.
- PTV VISSIM (2010) User Manual. PTV – Planung Transport Verkehr AG, v.5.30.
- RAKHA, H.; HELLING, B.; VAN AERDE, M.; PEREZ, W. (1996) Systematic Verification, Validation and Calibration of Traffic Simulation Models. Proceedings of the 75th Annual Meeting of the TRB, Washington, D.C., EUA.
- RILETT, L. R.; SCHULTZ, G. G. (2005) Calibration of Distributions of Commercial Motor Vehicles in CORSIM. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1934, pp. 246-255.
- SACKS, J.; N. ROUPHAIL; B. PARK e P. THAKURIAH (2002) Statistically Based Validation of Computer Simulation Models in Traffic Operations and Management. Journal of Transportation and Statistics, v. 5, n. 1, pp. 1–24.
- SILVA, P. C. M.; TYLER, N. (2001) Sobre a Validação de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego. In: Anais do XV Congresso de Ensino e Pesquisa em Transportes, ANPET, Campinas.
- SOARES, G. L. (1997) Algoritmos Genéticos: Estudo, Novas Técnicas e Aplicações. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte.
- SPIEGELMAN H. C.; E. S. Park e L. R. Rilett (2010) Transportation Statistics and Microsimulation. Ed. Chapman & Hall/CRC. USA.
- TOLEDO, T. e KOUTSOPOULOS, H. N. (2004) Statistical Validation of Traffic Simulation Models. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1876, TRB, National Research Council, Washington, D.C., pp. 142-150.
- TRB (2000) HIGHWAY CAPACITY MANUAL. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.
- WANG, Y. e P. D. PREVEDOUROS (1998) Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in Replicating Volumes and Speeds on Three Small Networks. Transportation Research Record, n. 1644, p. 80-92.
- WIEDEMANN, R. e REITER, U. (1992) Microscopic Traffic Simulation - The Simulation System Mission – Background and Actual State.
- ZHIZHOU, W., JIAN, S. E. Y. XIAOGUANG (2005) Calibration of Vissim for Shanghai Expressway Using Genetic Algorithm. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Eds. M. E. Kuhl, N. M. Steiger, F. B. Armstrong, and J. A. Joines, pg.2645-2648.