



**FACULDADE DE TECNOLOGIA E CIÊNCIAS SOCIAIS
APLICADAS – FATECS
CURSO: ENGENHARIA CIVIL**

JULIANA LINDER DE OLIVEIRA

**VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA REPRESENTAÇÃO DO
TRÁFEGO NO SIMULADOR AIMSUN A PARTIR DE
METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO**

Brasília
2014

JULIANA LINDER DE OLIVEIRA

**VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA REPRESENTAÇÃO DO
TRÁFEGO NO SIMULADOR AIMSUN A PARTIR DE
METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil do
UniCeub - Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.^a Civil Mônica Soares
Velloso, D.Sc.

Brasília
2014

JULIANA LINDER DE OLIVEIRA

**VERIFICAÇÃO DA QUALIDADE DA REPRESENTAÇÃO DO
TRÁFEGO NO SIMULADOR AIMSUN A PARTIR DE
METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado como um dos requisitos para a
conclusão do curso de Engenharia Civil do
UniCEUB - Centro Universitário de Brasília.

Orientadora: Eng.^a Civil Mônica Soares
Velloso, D.Sc.

Brasília, 5 de Dezembro de 2014.

Banca Examinadora

Prof.(a): Mônica Soares Velloso, D.Sc.
Orientadora (UniCeub)

Prof.(a): Erika Regina Costa Castro, M.Sc.
Examinador Interno (UniCeub)

Eng. Civil: Vladimir Eugênio Pascoal Campelo, Esp.
Examinador Externo, (GDF)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o maior engenheiro de todos, que esteve comigo não somente esses anos como universitária, mas em todos os momentos.

A minha orientadora Mônica, pelo suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos. Agradeço também a todos os meus professores, por me proporcionar o conhecimento, não apenas racional, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender.

Agradeço a minha amada família por todo o apoio, em especial aos meus pais, que sempre tiveram como prioridade minha educação, e a minha querida irmã que me ajudou muito durante o curso.

Ao meu marido Tiago, que está comigo desde que prestei o vestibular pra engenharia, e me apoiou nessa decisão. E quando nos mudamos para Brasília, me incentivou a dar continuidade à minha formação.

Meus agradecimentos aos amigos, colegas de faculdade e trabalho, que fizeram parte da minha formação, em especial à Catherine, irmã do coração, pelas longas horas de estudos, pela paciência de me explicar algo que não entendia e que, mesmo distante, vai continuar presente em minha vida, com certeza.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte da minha formação, muito obrigada.

RESUMO

Os modelos de simulação microscópica são ferramentas importantes no que diz respeito ao planejamento e gestão de vias urbanas. Porém é importante que os parâmetros de seus modelos sejam bem calibrados, para que esses programas representem devidamente a realidade e torne seu uso de grande valia para solucionar problemas de tráfego.

A calibração dos parâmetros de um simulador é um trabalho complexo, devido ao número elevado dos mesmos. Frente a essa dificuldade, Ayala (2013) propôs uma simplificação no processo de calibração, identificando os parâmetros que são relevantes.

Essa pesquisa se propôs a testar a calibração de um grupo de parâmetros, partindo da comparação das medidas de desempenho encontradas em um cenário real e os dados pelo simulador de tráfego Aimsun.

Desta maneira, estudou-se um cruzamento simples, localizado no Plano Piloto, onde foram coletados os dados necessários para a calibração do simulador. O estudo permitiu a calibração do parâmetro “tempo de reação” e comprovou a eficácia do procedimento.

PALAVRAS-CHAVE: simulação microscópica, Aimsun, calibração, parâmetros, interseção isolada.

ABSTRACT

QUALITY CHECK OF TRAFFIC REPRESENTATION IN THE AIMSUN SIMULATOR FROM CALIBRATION METHODOLOGY

The microscopic simulation models are important tools regard the planning and management of urban roads. However, it is important that the parameters of their models are well calibrated, so that these programs properly show the reality, and make use of great value to solve traffic problems.

The calibration of the parameters of a simulator is a complex task due to the high number of them. Faced with this difficulty, Ayala (2013), proposed a simplification in the calibration process, identifying the parameters that are relevant.

This research intention is to test the calibration of a group of parameters, based on the comparison of the performance measures found in a real scenario, and data by AIMSUN traffic simulator.

Thus, we studied a simple cross, located in the Pilot Plan, where we collected data necessary for simulation calibration. The study allowed the calibration parameter "reaction time", and proved the effectiveness of the procedure.

KEYWORDS: microscopic simulation, Aimsun, calibration parameters, isolated intersection.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distribuição do volume de veículos na interseção

Tabela 2 – Ciclos dos sinais luminosos

Tabela 3 – Medidas de desempenho para Tempo de Reação = 1,80 s

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Representação gráfica dos tipos de veículos
- Figura 2 – Zona de caracterização de mudança de faixa
- Figura 3 – Processo de calibração de um simulador
- Figura 4 – Distância à Zona 1 e Distância à Zona 2
- Figura 5 – Configuração do cenário para intersecção isolada
- Figura 6 – Configuração do cenário para rede arterial (Rede 121)
- Figura 7 – Configuração do cenário para rede arterial (Rede 131)
- Figura 8 – Intersecção Isolada para os cenários 1 e 3
- Figura 9 – Rede arterial 121 para os cenários 5 e 7
- Figura 10 – Distribuição do volume de tráfego e aproximações
- Figura 11 – Conjunto de parâmetros para os 12 cenários
- Figura 12 – Conjunto de parâmetros importantes para cenários com controle de tráfego
- Figura 13 – Intersecção Isolada – Via W4 Norte altura da Quadra 707
- Figura 14 – Representação da Intersecção Isolada
- Figura 15 – Simulação no Aimsun (intersecção isolada W4, quadra 707, Asa Norte)

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparação Maio 2103 e Maio 2014

Gráfico 2 – Volume de carros x dias da semana

Gráfico 3 – Volume de carros x hora x dia da semana

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 FORMULAÇÕES DO PROBLEMA	13
1.2 HIPÓTESE	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 METODOLOGIA	15
2. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	16
2.1 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	16
2.1.1 Nível de detalhamento	17
2.1.2 Representação do Processo	17
2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO	17
2.3 ESTRUTURAS BÁSICAS DO MICROSSIMULADOS AIMSUN	18
2.4 MODELOS COMPORTAMENTAIS DOS VEÍCULOS	20
2.4.1 Modelo Car-following (interação entre os veículos)	20
2.4.2 Modelo Lane-changing (mudança de via)	23
2.4.3 Aceitação Gap (intervalo crítico)	25
2.5 CALIBRAÇÃO	26
3. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS	28
3.1 PROCESSO DE SIMULAÇÃO NO AIMSUN	28
3.2 PARÂMETROS	28
3.2.1 Parâmetros locais da seção	29
3.2.2. Atributos do veículo	34
3.2.3 Parâmetros globais da seção	38
3.3 PARÂMETROS QUE PODEM SER CALIBRADOS	44
3.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO	44
4. PROCEDIMENTO REALIZADO POR AYALA (2013) PARA A IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA CALIBRAÇÃO.	47
4.1 PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DA SITUAÇÃO A SER ESTUDADA	47

4.2 SEGUNDA ETAPA: CONDIÇÕES GERAIS DO CENÁRIO.....	49
4.2.1 Interseção isolada	49
4.2.2. Redes Arteriais	50
4.3 TERCEIRA ETAPA: CARACTERIZAÇÕES DOS CENÁRIOS	51
4.3.1 Interseção Isolada	52
4.4 QUARTA ETAPA: ESTABELECIMENTOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO.....	54
4.5 QUINTA ETAPA: DEFINIÇÕES DO CONJUNTO DE PARÂMETROS E DOS SEUS RESPECTIVOS VALORES.....	54
4.6 SEXTA ETAPA: SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS.....	55
4.7 SÉTIMA ETAPA: ANÁLISE ESTATÍSTICA SOBRE A SIGNIFICÂNCIA DE CADA PARÂMETRO SOBRE O RESULTADO DA SIMULAÇÃO	56
4.8 OITAVA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS	57
5. ESTUDO DE CASO	59
5.1 INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO.....	59
5.2 IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO CENÁRIO DE ESTUDO	59
5.2.1 Dados Geométricos.....	60
5.3 CONDIÇÕES GERAIS DO CENÁRIO.....	60
5.3.1 Tipos de Controle	60
5.3.2 Composição do fluxo	61
5.3.3 Volume de Tráfego	61
5.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO	64
5.4.1 Tempo Médio de Atraso	65
5.4.1 Comprimento Médio das Filas	65
5.5 PARÂMETROS A SEREM CALIBRADOS	66
5.6 SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO	66
5.6.1 Simulação do cenário escolhido.....	67
5.6.2 Calibração do parâmetro “Tempo de Reação”.....	68
6 CONCLUSÃO.....	70
6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	70
6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA..... 72

1. INTRODUÇÃO

Na Engenharia de Tráfego, ferramentas computacionais são amplamente utilizadas para reproduzir situações reais do trânsito. Tais ferramentas facilitam o dia a dia daqueles que planejam e controlam os sistemas de transportes e vêm sendo aperfeiçoadas nas últimas décadas, permitindo que as representações possibilitem estudos dos sistemas reais. Porém, para que esses softwares representem devidamente uma situação real, é necessário que os parâmetros dos seus modelos sejam devidamente calibrados.

Os microssimuladores de tráfego buscam representar da forma mais exata possível o deslocamento de cada veículo numa rede viária. A modelagem microscópica está baseada na representação do deslocamento de veículos individuais e os fatores importantes nestes modelos são: a velocidade do veículo individual, a reação a outros veículos, entre outros (REIMMAN, 2007).

Aimsun (*Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks*) é um simulador microscópico comercializado pela *Transport Simulations Systems* (TSS) e, como tal permite modelar o comportamento de cada veículo individualmente em um tempo de simulação preestabelecido. Ele é amplamente utilizado em testes de implantação de novos sistemas de controle de tráfego e foi desenvolvido como ferramenta de apoio aos engenheiros.

Normalmente nos simuladores mais sofisticados, o número de parâmetros é muito elevado, o que torna a calibração muito difícil para os usuários dos programas de simulação. Estudo recente utilizando o Aimsun identificou quais parâmetros são relevantes no processo de calibração, levando a resultados confiáveis. Desta forma, no trabalho de calibração do microssimulador serão considerados apenas esses parâmetros. Porém o estudo tem limitações, pois foi feita apenas uma análise de sensibilidade do microssimulador à calibração dos parâmetros. Torna-se, então, importante comprovar em cenários reais, ou seja, ao calibrar os parâmetros propostos devem-se encontrar as mesmas medidas de desempenho tanto no microssimulador, quanto no cenário real.

1.1 FORMULAÇÕES DO PROBLEMA

A confiabilidade dos resultados de uma simulação é maior quando o processo de calibração é realizado buscando a representação da realidade, mas esse processo é dificultado pela grande quantidade de parâmetros. Todavia, eles podem ser calibrados de maneira que permitam a devida representação. Dentre esses parâmetros podem-se destacar dados de geometria da via, dados de tráfego da rede, atributos dos veículos, comportamento dos condutores, entre outros.

Ayala (2013) propôs um grupo de parâmetros que estão relacionados às características da via e ao comportamento dos motoristas, no qual o simulador Aimsun se mostra sensível, e que, se devidamente calibrados, permitem a representação da realidade pelo microssimulador.

Na referente pesquisa, existem limitações na utilização dos resultados para diferentes aplicações do microssimulador, pois foram adotadas simplificações nos cenários, como a presença de pedestres e outros tipos de veículos. Assim a influência dos mesmos não pôde ser avaliada. No estudo também não foram contempladas redes maiores e malhas fechadas, apenas redes abertas e com um pequeno número de interseções. E por último, não foram investigadas as relações entre os parâmetros calculados, ou seja, a significância de cada parâmetro foi avaliada levando em consideração os demais parâmetros com os respectivos valores *default*.¹

A partir dos resultados encontrados por Ayala (2013), é recomendável dar continuidade a essa linha de pesquisa, seja levar em consideração as limitações já citadas, ou aplicar seus resultados em um sistema real.

A última proposta foi o que motivou o presente estudo, no qual, calibrando o grupo de parâmetros, proposto pelo estudo já citado, para a simulação de um cenário real, é possível encontrar as medidas de desempenho (dados de saída do simulador), que sejam comuns entre a realidade e a simulação.

1.2 HIPÓTESE

É possível calibrar um grupo de parâmetros para a simulação de um cenário real e

¹ Valores *default* são os valores padrão que o programa atribui para cada parâmetro.

encontrar as medidas de desempenho (dados de saída do simulador), que sejam comuns entre a realidade e a simulação.

1.3 OBJETIVOS

A meta da pesquisa relatada nesta monografia é calibrar um pequeno grupo de parâmetros, pré-definidos em pesquisa recente, utilizando o simulador de tráfego Aimsun, que é considerado um software muito sofisticado, pelo fato de haver um grande número de parâmetros a ser calibrados. Ao fazer isso, o objetivo é encontrar medidas de desempenhos idênticas às encontradas no cenário real. Adotou-se, então, um estudo de caso, para o qual um cruzamento simples de Brasília foi analisado, coletando os dados necessários para a calibração dos parâmetros no simulador Aimsun propostos por Ayala (2013). Assim, foram estabelecidos os seguintes objetivos gerais e específicos para a pesquisa:

Objetivo geral:

Verificar a qualidade da representação do tráfego no simulador Aimsun, a partir da calibração de um pequeno grupo de parâmetros, levando em consideração as medidas de desempenho.

Objetivos específicos:

1. Identificar os parâmetros a ser calibrados;
2. Simular um cenário de Brasília no modelador de tráfego Aimsun, calibrando um conjunto de parâmetros.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os microssimuladores são programas que permitem a análise de alternativas da geometria viária e de sistemas de controle de operação de tráfego. A sua utilização é de grande importância, pois em muitos casos dispensa a realização de testes em campo, por ser difícil a realização do estudo.

No processo de simulação, é de grande importância o processo de calibração. Esse processo é muito difícil, já que existe um número considerável de parâmetros para calibrar, complicando o processo de calibração. Segundo Ayala (2013), é importante destacar que a qualidade dos resultados da simulação depende totalmente das condições que o simulador

oferece para a representação da realidade, isto é, da qualidade de sua calibração.

Ayala (2013) propõe que existe um conjunto reduzido de parâmetros para o simulador Aimsun e que, se devidamente calibrado, permite a representação adequada da realidade a ser modelada com o programa. Neste contexto, o presente estudo se justifica por calibrar esse conjunto reduzido de parâmetros e verificar se as medidas de desempenho correspondem com a realidade.

1.5 METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido com base num procedimento de calibração onde os parâmetros que afetam os resultados da simulação foram determinados anteriormente. Compete a este trabalho confirmar se a calibração de um grupo de parâmetros representa devidamente a realidade.

A metodologia de desenvolvimento deste trabalho é dividida em seis etapas:

- Etapa 1: A **Revisão Bibliográfica**, consiste na pesquisa por assuntos que contribuam para o embasamento teórico desta monografia, buscando principalmente livros, dissertações, teses, artigos científicos que falem sobre modelos de simulação microscópica e a calibração.
- Etapa 2: **Identificação dos parâmetros** que devem ser calibrados e **verificação das variáveis** para a coleta, essa busca será realizada na dissertação de Ayala (2013), pois em sua dissertação, os parâmetros para o cenário escolhido já estão definidos.
- Etapa 3: **Escolher um cenário** de Brasília, por facilitar as coletas, tendo como base os cenários já propostos. Essa escolha será realizada com auxílio do Google Earth, pois facilitará a verificação da geometria.
- Etapa 4: O dia e horário da **Coleta de dados** serão escolhidos levando em consideração o volume de tráfego existente nas vias.
- Etapa 5: **Tratar dados e definir os arranjos de testes**
- Etapa 6: Para a **simulação do cenário** no modelador de tráfego Aimsun, serão utilizados os dados coletados. Logo depois de desenhada a malha, será iniciado o processo de **calibração dos parâmetros**.

2. SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Nos anos de 1930, foram dados os primeiros passos no estudo sobre a circulação de tráfego, a partir da teoria da probabilidade de descrição de tráfego. Depois da segunda Guerra Mundial, os avanços na área foram significativos, pois houve um crescimento das malhas viárias e da indústria de automóvel e isso gerou a necessidade de novos estudos. Lighthill e Whitham (1955) propuseram a teoria do fluxo de tráfego (*Traffic Flow Theory*), no início da década de 50, onde é feita uma analogia entre os veículos no tráfego e as partículas num fluido, ela ajuda a compreender as propriedades do fluxo de tráfego, a fim de avaliar a capacidade das vias existentes ou projetar novas estradas.

O trabalho de aplicação da teoria de fluxo se desenvolveu graças à evolução da capacidade dos computadores, tanto no que diz respeito ao hardware quanto aos softwares, também graças à demanda por parte da sociedade, que buscou conhecer as consequências dos projetos de transporte. Assim, se tornou possível resolver problemas de grande escala de uma forma mais simples. Os simuladores atuais não trabalham apenas com aspectos teóricos da Engenharia de Tráfego, mas incorporam, também em sua linguagem, conceitos da Psicologia, para que possa ser tratada de forma eficaz a interação veículo e motorista (LA CALLE, 2003).

Os primeiros modelos de simulação para análise de operações de tráfego em vias rápidas apareceram no final dos anos de 1960 e 1970. Entre eles se destacam *FREQ*, *CORQ* e *INTRAS*, e nos anos de 1980 e 1990, com o *FRESIM*, *KRONOS*, *INTEGRATION*, *PARAMICS* e *AIMSUN-2*. O teste de sistemas através de simulação exige menor recurso e possibilita maior segurança, uma vez que não é necessária a sua implementação na vida real elas tornam-se cada vez mais simples e eficazes em função da evolução tecnológica, no entanto continua a ser um processo complexo (GOMES, 2004).

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS DE SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Os modelos de simulação, por suas características de aleatoriedade, incorporam a variabilidade da demanda ao longo do tempo, o que lhes confere um maior poder de representatividade (PORTUGAL, 2005). Tal versatilidade permite detalhar o modelo de

acordo com a necessidade assim a classificação leva em conta as entidades consideradas e seu nível de descrição, dividindo-se:

2.1.1 Nível de detalhamento

Macroscópica: Nesse caso, a individualidade dos veículos é desprezada, ou seja, o tráfego é calculado como um todo, não fazendo distinção entre as partes constituintes. Segundo Lighthill e Withhan (1955), o fluxo é concebido como um fluido. Exemplos desta classe de modelos incluem AUTOS, FREFLO, KRONOS, etc.

Mesoscópica: O nível de detalhe é intermediário não distinguindo a singularidade dos veículos, eles são agrupados em pelotões. Os modelos mesoscópicos são normalmente utilizados em redes semaforicas e procuram explicar a deformação desses pelotões ao longo do tempo e do espaço, com base na Teoria da Dispersão de Fluxos de Tráfego (PORTUGAL 2005).

Microscópica: Os veículos na corrente de tráfego são tratados individualmente, sendo os modelos tão detalhados quanto seu propósito. Sua fundamentação teórica se baseia nas Leis de Sequência ou de Perseguição entre os veículos.

2.1.2 Representação do Processo

A representação do modo de comportamento dos veículos, bem como as leis que regem as interações entre os sistemas, pode ser realizada tendo duas abordagens:

Determinístico: As variáveis se caracterizam pela certeza. Neste caso são utilizados termos matemáticos precisos para defini-las.

Estocástico: As variáveis podem ser aleatórias e obedecem às leis de distribuição predeterminadas, ou seja, baseia-se em decisões mais próximas da realidade. É o tipo mais utilizado (PORTUGAL, 2005).

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA SIMULAÇÃO

Segundo McLean (1989), a principal vantagem dos simuladores é a possibilidade de controlar as variáveis que influenciam o tráfego, isso no que diz respeito à observação da

corrente de tráfego. Pode-se destacar também como vantagens da simulação (ANDRADE, 1994; SHANNON, 1992):

- a) A possibilidade de se comprimir/expandir o tempo (sistemas reais requerem anos, podendo ser representados em tempos muito inferiores através da simulação).
- b) A identificação e o controle de variabilidade nos sistemas, a antecipação de resultados em algumas intervenções, sem custo e perigo da manipulação do próprio sistema.
- c) A possibilidade de parar o experimento a qualquer momento para análise de desempenho do sistema.
- d) Testar novos projetos, *layouts* físicos, sem a necessidade de ejetar recursos para sua implantação.
- e) Flexibilidade no nível de detalhe.
- f) Custo reduzido em relação a um experimento real.
- g) A possibilidade de simular condições difíceis ou impossíveis de serem observadas na prática ou combinações de características de fluxo e de vias que são inexistentes (GOMES 2004).

Quanto às desvantagens, a simulação sofre das mesmas desvantagens que modelos matemáticos e experimentos laboratoriais, onde existe sempre a suspeita de que o modelo ou experimento não seja capaz de representar devidamente a situação real que se deseja estudar (GOMES 2004).

Para Oliveira (1988), se a complexidade do sistema crescer, o tempo necessário para obter os resultados também irá ser maior.

Para Portugal (2005), a principal desvantagem da simulação é a morosidade e a falta de rigor técnico.

Ainda, segundo Saliby (1989), podem-se destacar desvantagens relacionadas às dificuldades de modelagem e de programação; o tempo de processamento; à baixa precisão dos resultados fruto da utilização da amostragem; e à validação dos resultados, seja de modelo conceitual seja do computadorizado.

2.3 ESTRUTURAS BÁSICAS DO MICROSSIMULADOS AIMSUN

Segundo Vilarinho (2008), durante a simulação no Aimsun existem elementos (veículos) cujo estado se altera continuamente, e outros elementos (sinais luminosos) que se alteram em momento específico, de forma discreta, isso porque o programa combina a escala temporal contínua com a discreta.

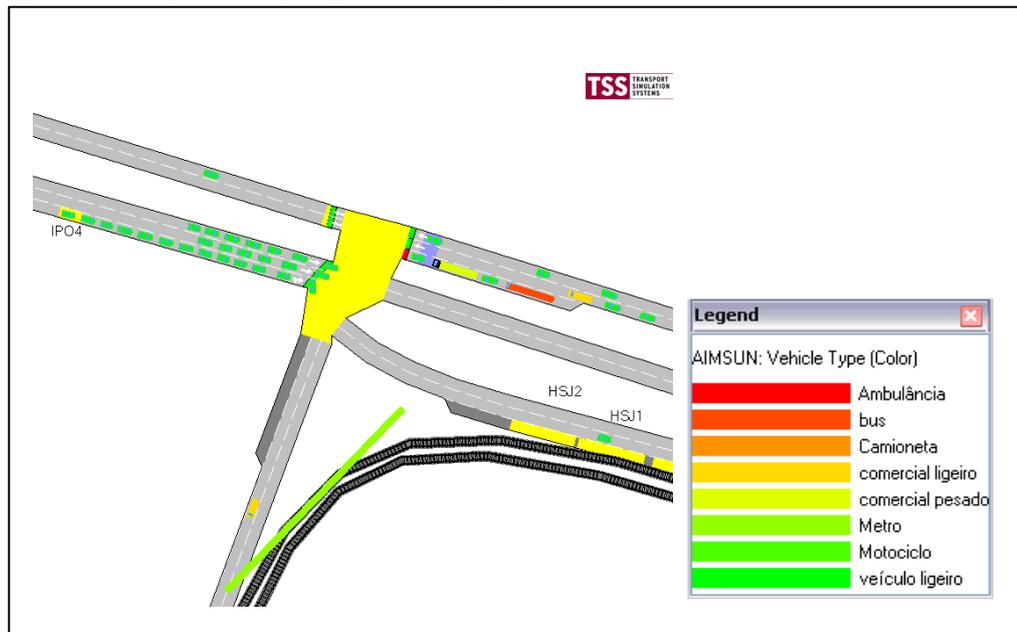
Vilarinho (2008) ainda fala sobre o alto nível de detalhe do modelo de modelação da rede, pois é possível fazer a diferenciação de veículos (pesado, ligeiros e autocarros...), e também distinguir os diferentes comportamento do condutor, pois o fator psicológico também influencia no tráfego.

No modelo Aimsun as redes físicas são simbolicamente representadas por arcos e nós, onde arcos são as faixas de rodagem, e os nós são as interseções. O modelo ainda permite simular, a nível de sistema de controle, sinais luminosos (semáforos), placas de PARE e faixas de passagem de pedestre.

A modelação de tráfego pode ser feita de duas formas distintas. Primeiramente pode-se basear na matriz de Origem-Destino, onde fica configurado por tipo de veículo, e é definido pelo número de viagens entre cada centroide de origem e de destino, escolhendo pelo caminho mais curto entre eles. A segunda hipótese, os dados são baseados no volume de tráfego de entrada na rede e as probabilidades de realizarem certo movimento em cada nó, ou seja, os veículos são inseridos nos arcos de entrada e distribuídos aleatoriamente de acordo com as probabilidades de viragem definidas para cada arco da rede. Deste modo não existe nenhum conhecimento prévio do percurso total de um veículo, apenas se sabe em cada arco qual a probabilidade de optar por determinado movimento (VILARINHO, 2008).

Os veículos podem ser agrupados por tipo e classe, independente do tipo de programação escolhido para a procura da rede. Assim é possível estabelecer diferenciações dos veículos que não possuam as mesmas características (ligeiros, comerciais pesados, ambulâncias, motociclos, bicicletas, etc.). Cada tipo de veículo pode ser caracterizado por diferentes variáveis e os parâmetros estão sujeitos à validação e calibração, como comprimento, largura do veículo, velocidade máxima, aceleração máxima, desaceleração, grau de aceitação da velocidade por parte dos condutores, mínima distância entre veículos, intervalo crítico, probabilidade de seguir recomendações no caso de existirem painéis e tempo de reação.

Figura 1 – Representação gráfica dos tipos de veículos



Fonte: Vilarinho (2008)

2.4 MODELOS COMPORTAMENTAIS DOS VEÍCULOS

O Aimsun tem a capacidade de reproduzir várias redes e condições reais de tráfego em uma plataforma computacional e sua grande vantagem é poder modelar uma rede de tráfego em detalhe e produzir várias medidas de desempenho (AYALA, 2013). Os veículos, ao longo de seu movimento na rede, deslocam-se de acordo com os modelos que descrevem o comportamento dos diferentes condutores: a interação entre os veículos (*car-following*), a mudança de via (*lane-changing*) e o intervalo crítico (*gap-acceptance*), de modo garantir que os veículos não colidam. Ayala (2013) ainda acrescenta que os modelos explicam o comportamento do veículo em intervalos de tempo durante a simulação. Esses modelos se explicam pelo fato, de que cada veículo procura viajar na sua velocidade máxima, mas o ambiente, os outros veículos e as regras de circulação limitam e condicionam o seu movimento.

2.4.1 Modelo Car-following (interação entre os veículos)

O modelo de *car-following* descreve a interação longitudinal entre um par de veículos que viajam na mesma via, designado por líder (*leader*) e seguidor (*follower*) (VILARINHO,

2008), é assumido que o carro é seguidor quando seu comportamento está condicionado pelo veículo que o antecede, pois se assumido que o veículo seguidor viajasse na velocidade desejada, ele iria colidir com o veículo que o precede. Ayala (2012) completa que assumido que os motoristas tendem a viajar na velocidade desejada em cada seção, mas que os veículos precedentes, adjacentes, os sinais de trânsito e obstáculos condicionam os comportamentos dos veículos.

Baseado no modelo de Gipps (1981 e 1986), no modelo *car-following* os parâmetros variam em função de diferentes fatores locais, como, o tipo de motorista, a geometria da seção, a presença de outros veículos em faixas adjacentes, e as características dos veículos.

a) Pressupostos

No modelo original de Gipps (1981), a velocidade do veículo “n” é calculada pelas Equações 2.1 e 2.2 e seu valor no tempo “ $t+T$ ” é tomado como o menor valor dentre os dois valores calculados.

Basicamente, o modelo de *car-following* depende de dois componentes, a aceleração que representa a intenção de um veículo em alcançar certa velocidade desejada e desaceleração que reproduz limitações impostas pelo veículo precedente quando o motorista tenta alcançar a velocidade desejada (TSS, 2010).

Este modelo afirma que a velocidade máxima a qual um veículo (n) pode acelerar durante um período de tempo ($t, t+T$) é dada pela Equação 2.1.

$$V_a(n, t+T) = (n, t) + 2,5a(n)T (1 - (V(n, t)/V^*(n)) \{0,025 + [V(n, t)/V^*(n)]\})^{1/2} \quad (2.1)$$

Onde:

$V_a(n, t+T)$ = velocidade máxima de acordo com a componente aceleração (m/s);

$V(n, t)$ = velocidade do veículo n no tempo t (m/s);

$V(n)$ = velocidade desejada pelo veículo n para a seção atual (m/s); 16

$a(n)$ = máxima aceleração para o veículo n (m/s²).

Considera, também, que a máxima velocidade que o mesmo veículo pode atingir, no mesmo intervalo de tempo ($t, t+T$), de acordo com suas próprias características e as limitações impostas pela presença do veículo líder (veículo $n-1$), é determinada pela Equação 2.2.

$$V_b(n, t+T) = d(n)T + \{[2(x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)) - v(n, t)T - (v(n-1, t)^2/d'(n-1))]\}^{1/2} \quad (2.2)$$

Onde:

$V_b(n, t+T)$ = velocidade máxima de acordo com a componente desaceleração (m/s);

$d(n)$ (< 0) = máxima desaceleração desejada pelo veículo n (m/s²);

$x(n, t)$ = posição do veículo n no tempo t (m);

$x(n-1, t)$ = posição do veículo líder ($n-1$) no tempo t (m);

$s(n-1)$ = distância efetiva do veículo ($n-1$) (m);

$d'(n-1)$ = estimativa de desaceleração do veículo ($n-1$) (m/s²).

Em qualquer caso, a velocidade definitiva para o veículo n durante o intervalo de tempo $(t, t+T)$ é a mínima das velocidades definidas anteriormente, conforme apresentado na Equação 2.3.

$$V(n, t+T) = \min \{V_a(n, t+T), V_b(n, t+T)\} \quad (2.3)$$

Então, a posição no veículo n é definida pela equação (2.4)

$$x(n, t+T) = x(n, t) + V_{\min}(n, t+T)T \quad (2.4)$$

Em que:

$x(n, t+T)$ = posição do veículo n no intervalo $t+T$ (m);

$x(n, t)$ = posição inicial do veículo (m);

$V_{\min}(n, t+T)$ = menor velocidade obtida pelas Equações (2.3) e (2.4) (m/s);

T = intervalo de tempo adotado no processo de simulação - atualização dos dados (s).

b) Modificações do modelo *car-following* no Aimsun

O *software* apresenta variações na estimativa da desaceleração do líder. Na versão v4.1, segundo Ayala (2013), a estimativa de desaceleração do líder é assumida como sendo a própria desaceleração desejada desse veículo (Equação 2.5). Entretanto, quando a razão entre as desacelerações do veículo seguidor e líder é relativamente alta, o componente de desaceleração do modelo apresenta instabilidades que pode fazer com que alguns veículos circulem muito próximos do veículo líder.

$$d'(n-1) = d(n-1) \quad (2.5)$$

Na versão v4.2, a estimativa de desaceleração do líder é igual à média entre a desaceleração do líder e a desaceleração do seguidor (Equação 2.6).

$$d'(n-1)=1/2\{d(n)+d(n-1)\} \quad (2.6)$$

Na versão v6.0, para assegurar a restrição de *headway* mínimo, a desaceleração do veículo líder é obtida com o uso do parâmetro “a”, denominado “*sensitivity factor*” (Equação 2.7).

$$d'(n-1)+d(n-1)*a \quad (2.7)$$

Quando $a < 1$ o veículo seguidor subestima a desaceleração do líder e se torna mais agressivo, aproximando-se mais. Para $a > 1$ o veículo seguidor superestima a desaceleração do líder e se torna mais cuidadoso, mantendo uma distância maior.

2.4.2 Modelo *Lane-changing* (mudança de via)

A mudança de via é modelada como um processo de decisão, desenvolvido por Gipps em 1986, o modelo *lane-changing* no qual o Aimsun aplica é baseado numa decisão onde três perguntas são formuladas, essas perguntas são referentes a necessidade, desejabilidade e possibilidade de mudança de faixa, ou seja, existem 3 motivos para a mudança de faixa:

Mudança obrigatória: A mudança de via acontece geralmente de forma obrigatória, quando é imposta a saída do veículo da via, seja porque a via vai terminar, a via não permite o movimento desejado ou o tipo de veículo, a via se encontra bloqueada por algum incidente.

Mudança sem restrições: O veículo quer melhorar sua posição na via em relação aos outros veículos, principalmente para poder continuar sua viagem em máxima velocidade possível. Na existência de vias múltiplas o veículo irá optar por aquela que possui uma velocidade de circulação superior e que não seja interrompida logo à frente. A mudança de via pode ocorrer devido à existência de filas de espera, pela paragem de carros e por movimentos de viragem em vias partilhadas.

Mudança antecipada: neste caso o veículo muda de via antecipadamente a movimentos lentos na via. A decisão está baseada na diferença entre a velocidade na via concorrente e nas vias adjacentes.

Por mais que se queira modelar o comportamento dos motoristas frente às tomadas de decisões, essa tarefa é muito difícil, pois o comportamento dos motoristas é complexo; alguns reduzem a velocidade ao observar que um veículo ao lado quer mudar de pista, já outros aceleram para que o veículo não cruze a sua frente. Por depender da decisão do condutor,

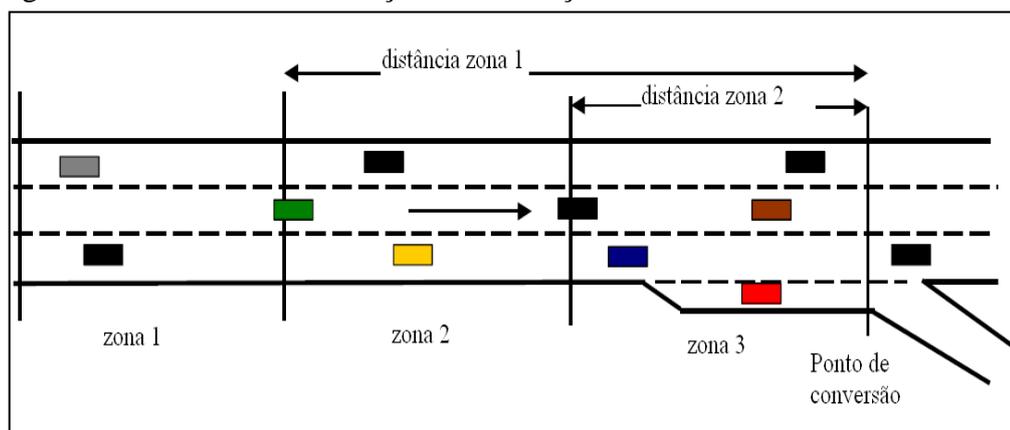
características como tempo de reação a uma determinada situação, variam de condutor para condutor e têm impacto direto no desempenho dos veículos.

Por ser um software muito rebuscado, o Aimsun reproduz o comportamento dos motoristas, seja do mais cordial e gentil ao mais agressivo. Isso é feito de forma aleatória, porem obedecendo à distribuição probabilística. Como já falado anteriormente, o modelo está baseado no de Gipps, onde existe uma tomada de decisão da mudança ou não de faixa.

É assumido que em cada momento de atualização do veículo é verificada se existe a necessidade de se mudar de via, de acordo com os motivos já descritos, e é perguntado: é necessário trocar de pista? A resposta depende se existe um intervalo entre os veículos na via de destino que permita a manobra com segurança, levando em consideração a velocidade de viagem praticada pelos veículos, já que a manobra tem um tempo finito durante o qual o veículo que irá executar a manobra pode acelerar ou desacelerar para concluí-la. Se a pergunta feita for positiva, o programa ainda faz duas perguntas, a primeira: é desejável a mudança de pista? Considera-se positiva, quando a futura faixa estiver fluindo em uma maior velocidade ou a fila for menor. A segunda pergunta: é possível a mudança de faixa? Neste caso utiliza-se a verificação *gap*, que nos diz a distância livre entre dos veículos na futura faixa.

Segundo Ayala (2013), visando a representação mais precisa do comportamento do motorista, no processo de decisão de mudança de faixa, são caracterizadas 3 zonas, como mostra na figura 2.

Figura 2 - Zona de caracterização de mudança de faixa



Fonte: Ayala (2013)

Zona 1 - indica a maior distância ao próximo ponto de conversão. As decisões de mudança de faixa são principalmente governadas pelas condições de tráfego das faixas envolvidas.

Zona 2 - representa a distância intermediária. Nesta zona a posição do veículo, com relação à faixa a partir da qual a conversão desejada pode ser realizada, afeta na decisão de mudança de faixa.

Zona 3 - é a distância mais curta ao próximo ponto de conversão (AYALA, 2013). Os veículos são forçados a atingir as faixas de conversão desejadas, reduzindo a velocidade, se for necessário, e até chegando a uma parada completa, a fim de tornar a mudança possível.

2.4.3 Aceitação Gap (intervalo crítico)

Como já mencionado, este modelo caracteriza o comportamento do condutor quando deseja mudar de faixa ou direção, mas necessita esperar até um o momento exato, ou seja, até que encontre um intervalo suficiente entre os veículos para completar a manobra, este tempo mínimo necessário é designado como intervalo crítico. O modelo leva em conta a distância dos veículos para um ponto de colisão hipotético, suas velocidades e taxas de aceleração. Isto então determina o tempo necessário para desobstruir a interseção e produzir uma decisão que é também uma função do nível de risco aceito por cada condutor.

Os parâmetros que influenciam o comportamento deste modelo são:

- Aceleração: a capacidade do veículo de acelerar influencia o tamanho do intervalo crítico necessário para a manobra ser executada em plena segurança;
- Intervalo crítico máximo: período de tempo a partir do qual o condutor começa a ficar impaciente por não encontrar um intervalo crítico de passagem. Quando o condutor se encontra à espera durante um tempo superior ao crítico, a margem de segurança (normalmente dois intervalos de simulação) é reduzida para metade (apenas um intervalo);
- Distância de visibilidade.

2.5 CALIBRAÇÃO

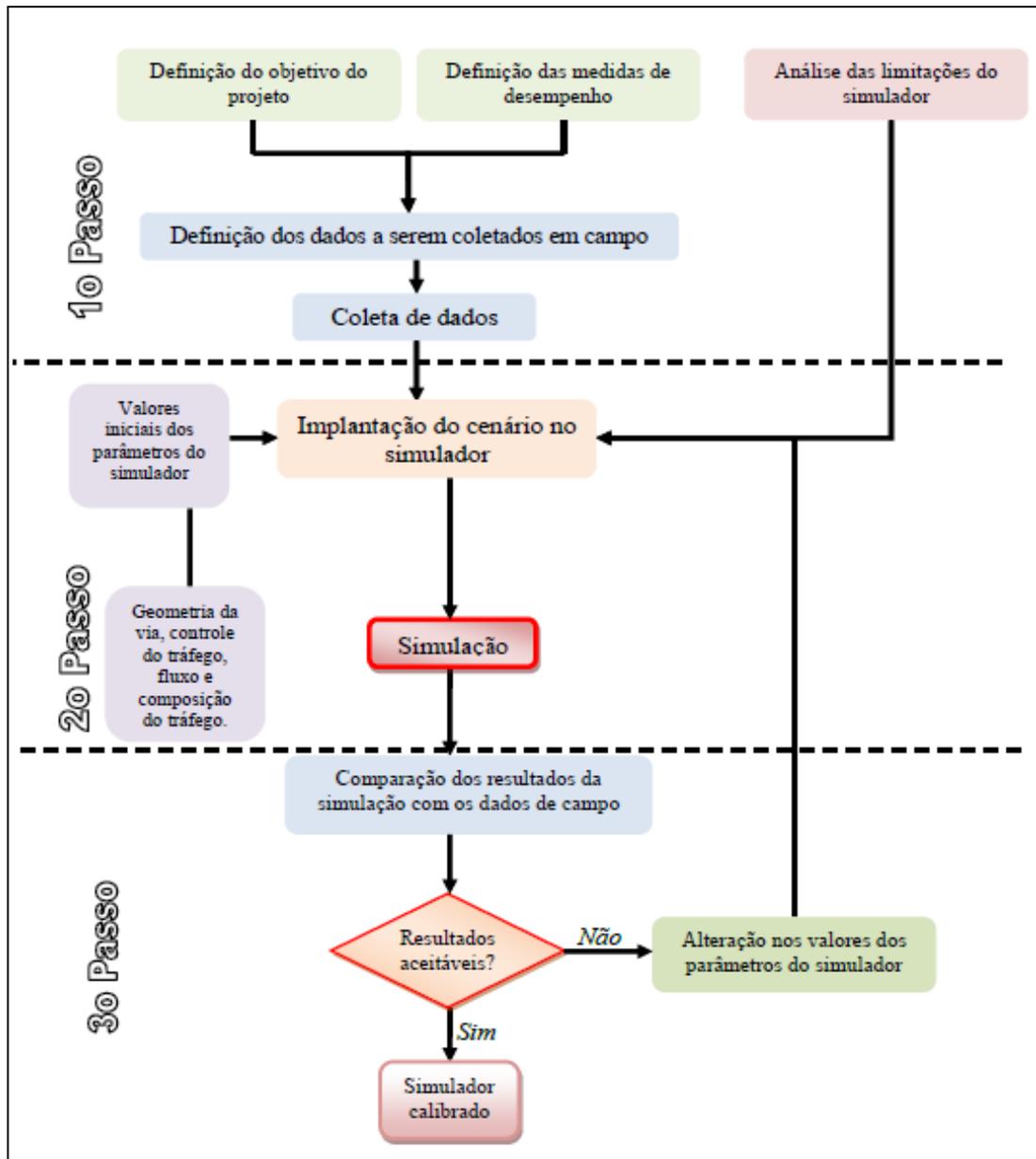
Segundo Hellinga (1998) calibração é o processo de ajustes dos valores dos parâmetros do modelo, utilizando dados observados para que o modelo possa representar realisticamente os componentes específicos do sistema modelado, que fica a carga do usuário, já que o modelo deve ser calibrado para cada sistema a qual se vai simular. O propósito da calibração é garantir que o microssimulador represente adequadamente a situação de tráfego a ser estudado. Para que se possa chegar ao objetivo da calibração, os dados, observados em campo, sobre o desempenho do tráfego, são comparados aos valores correspondentes produzidos pelo simulador.

O processo de calibração é muito complexo, devido principalmente à sofisticação dos microssimuladores, que tem um número de parâmetros elevados a ser calibrados. Assim torna-se necessário simplificar o processo, e inclui identificar os parâmetros que aperfeiçoem uma ou mais medidas de desempenho escolhidas pelo usuário para medir as diferenças entre a corrente de tráfego observada e simulada (RILLET; KIM, 2001).

Hellinga (1998), dividi o processo de calibração em três etapas: a primeira etapa consiste em definir os objetivos do estudo e da calibração; identificar os dados de campo necessários; a escolha das medidas de desempenho, que deve levar em consideração o objetivo do estudo, os dados disponíveis, e as limitações do simulador.

A segunda fase consiste na calibração inicial dos parâmetros, que inclui a preparação do cenário, com todas as características do cenário real, como, características comportamentais dos motoristas; características geométricas da via; o tipo de controle de tráfego nas intersecções; o volume de tráfego levando em consideração as respectivas origens-destinos; e a composição do tráfego, levando em consideração as características de cada veículo envolvido. Na terceira fase, os resultados fornecidos pelo simulador são comparados com os disponíveis, se o critério preestabelecido for satisfeito, então o modelo pode ser considerado adequadamente calibrado e pode ser utilizado para analisar outros cenários. Caso contrário, os valores dos parâmetros devem ser ajustados até que o critério preestabelecido seja satisfeito e o simulador possa ser considerado calibrado.

Figura 3 - Processo de calibração de um simulador



Fonte - Ayala (2013)

3. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS

3.1 PROCESSO DE SIMULAÇÃO NO AIMSUN

O ponto de partida para o processo de simulação é a configuração da rede, para isso são necessárias uma série de dados de entrada, como o mapa da área, detalhes da rede; número de faixas, rampa de elevação, faixas de conversão e velocidade média da via.

Os dados de demanda estão diretamente ligados ao fluxo de veículos, assim temos os tipos de veículos, o volume de tráfego e o tipo de controle de tráfego. Inseridos esses dados é possível iniciar a simulação.

3.2 PARÂMETROS

Segundo o manual TSS (2005), as variáveis usualmente sujeitas à calibração podem ser divididas por categorias de modo a facilitar o procedimento, de acordo com a influência que possuem sobre os elementos da rede.

As categorias de dados gerais a serem fornecidos pelo usuário para iniciar uma simulação, refere-se às seções da rede viária, aos veículos, e à rede viária local. Cada uma dessas categorias contém parâmetros que foram verificados no cenário de desenvolvimento do *software* e são apresentados no programa, conhecidos como parâmetros *default*. Os valores *default*, de cada parâmetro, encontram-se no manual TSS (2005), e na pesquisa de Ayala (2013).

Definem-se valores para esses parâmetros levando em consideração as características do tráfego e do ambiente a ser simulado. Esses parâmetros variam de país para país, Estado para Estado, e até de uma cidade para outra, pois estão em função do ambiente em que a via está inserida. Por meio da calibração encontram-se os valores apropriados para esses parâmetros.

3.2.1 Parâmetros locais da seção

O Aimsun trabalha com dez tipos de seções, arterial, auto-estrada, estrada, área de pedestres, anel viário, rotatória, rampas de entrada e saída, rua, rua, rua semaforizada e estrada urbana. Caso o usuário não defina uma seção para a simulação, o programa define como seção *default* a seção do tipo arterial. Em uma simulação microscópica, 19 parâmetros são apresentados, para cada seção trabalhada, assim é detalhado o significado de cada parâmetro a seguir.

a) Velocidade máxima

Este parâmetro corresponde, na verdade, a até três informações com relação à velocidade máxima: velocidade limite da seção, velocidade limite na faixa e velocidade de conversão.

a.1) Velocidade limite da seção

Máxima velocidade permitida para os veículos que viajam através de uma seção, expressa em km/h. Dependendo das características dos condutores, eles podem ou não seguir as recomendações da velocidade limite. O valor depende do tipo da seção da via. Na Tabela 3-1, verifica-se que o valor *default* na seção da via de tipo arterial é 50 km/h.

a.2) Velocidade limite na faixa

A máxima velocidade permitida, em km/h, para os veículos que viajam através de uma faixa particular. Por *default*, a velocidade limite é aplicada para todas as faixas da seção. Mas o usuário pode definir velocidades limites específicas para cada faixa das seções. Para o tipo de seção “arterial” o valor *default* é o mesmo valor da velocidade máxima da seção e se habilita caso seja necessário.

a.3) Velocidade de conversão

É a máxima velocidade, em km/h, para um veículo viajar quando realiza movimento de conversão. Dependendo das características dos condutores, eles podem usar uma velocidade alta ou baixa. Pode ser usado para simulações microscópicas e mesoscópicas. O veículo se desloca através de uma seção iniciando a desaceleração enquanto se aproxima da conversão a fim de alcançar esta velocidade de conversão no final da seção. A velocidade de conversão é mantida durante a conversão e quando entra na seção seguinte, o veículo iniciará a aceleração de novo conforme a velocidade desejada para esta seção; a opção para definir a

velocidade de conversão é habilitada caso seja necessário.

b) Capacidade

A capacidade da seção é definida a partir da capacidade estabelecida para cada faixa e é alterada automaticamente se o usuário realiza mudanças no número de faixas da seção. É expressa em termos de unidades de carro de passeio (ucp) por hora. A capacidade antiga (antes da mudança) é usada para calcular a nova. Caso o número de faixas seja incrementado, o valor da capacidade aumentará proporcionalmente ao valor da capacidade por faixa. O programa oferece valores *default* para a capacidade por faixa para cada tipo de seção da via. O valor *default* de 900 ucp/h é para seção de via arterial.

c) Largura da faixa

A largura da faixa está determinada em relação ao tipo de seção dentro da rede no processo de simulação. No programa, por *default*, para a maioria dos tipos das seções está definido um valor de 3m. No caso das rotatórias o valor *default* muda para 3.20m e em Autoestradas para 3.50m. Segundo o tipo de simulação, o programa apresenta três alternativas de tipo de faixa: normal livre; reservada para o transporte público; e reservada para veículos de carga.

d) Primeiro, segundo e terceiro custos definidos pelo usuário

Os três custos definidos pelo usuário podem ser usados como o custo expresso em termos de tempo, representando um valor econômico associado com a seção. Esses valores podem ser usados em algumas funções VDF (*volume delay function*). O programa apresenta valores *default* zero (0) e o uso desses custos é feito na modelagem macroscópica.

e) Modo de exibição

O modo de exibição das seções indica como estas serão apresentadas durante o processo de duração da simulação. Isto por exemplo, se o projeto consiste em simular uma rede ferroviária, o modo de exibição das seções não será como rodovia, a exibição será como ferrovia. No programa apresentam-se cinco alternativas de exibição, ou seja, como rodovia, como ferrovia, como trilha de bonde, sem exibição (que indica que o modelo não será simulado em 3D, só em 2D) e só semáforos (simulará só semáforos e *meterings*). Por *default* o modo de exibição do programa é “como rodovia”.

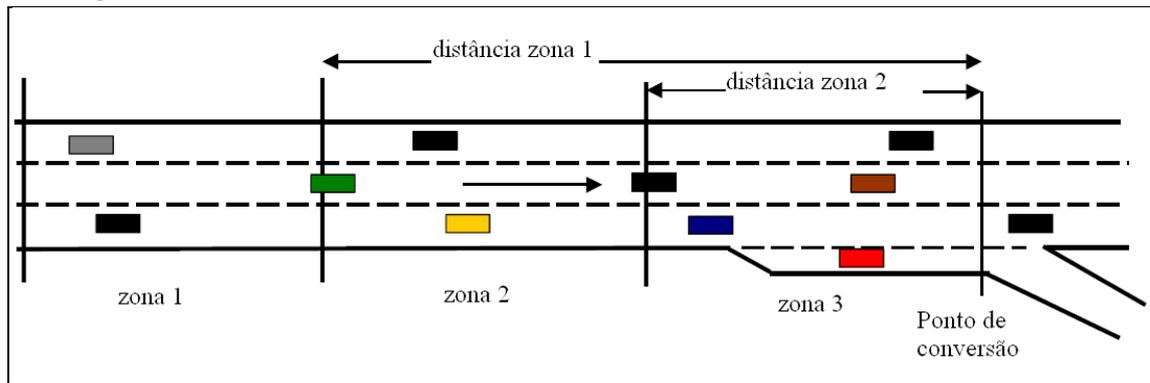
f) Distância à Zona 1 e distância à Zona 2

No processo de simulação, cada seção é dividida nas três zonas mostradas na Figura 4, em que a Zona 1 corresponde ao trecho em que o veículo analisa a situação e decide se vai ou não trocar de faixa em função de melhorar suas condições de circulação, isto é, a situação da conversão futura não é considerada; a Zona 2 é uma zona intermediária, em que o veículo procura trocar de faixa visando atingir a faixa de conversão; e a Zona 3 é uma zona em que o veículo é forçado a trocar de faixa de modo a atingir a faixa de conversão. Na Figura 4 são representadas graficamente as distâncias à Zona 1 e à Zona 2, assim como a distância de rampas de acesso (que corresponde à faixa de aceleração situada junto a essas rampas).

A distância à Zona 1 corresponde à distância entre o final da Zona 1 e o próximo ponto de conversão. Esta distância está definida como a distância de viagem (em metros) necessária para que o veículo atinja o local da conversão desejada e é usada no modelo *lane-changing*. Em versões anteriores esta distância era definida em unidades de tempo, e era convertida em espaço usando a função da velocidade limite e a velocidade desejada de cada veículo na seção. A razão para usar o tempo foi que a variação da distância dependia das características do veículo. A versão recente do programa (v7.0), esta distância é expressa em metros e varia para cada tipo de seção. O valor *default* em uma seção arterial é 300 m.

A distância à Zona 2 corresponde à distância entre o final da Zona 2 e o próximo ponto de conversão. Em versões anteriores, esta distância era definida como o tempo (segundos) necessário para viajar certo espaço ao longo da seção. A distância em tempo era convertida em espaço percorrido, usando a função da velocidade limite da seção e a velocidade desejada de cada veículo na seção. Na versão recente do programa (v7.0) este parâmetro é expresso em metros. Este parâmetro é usado no modelo de *lane-changing*. O valor *default* deste parâmetro varia para o tipo de seção; na seção do tipo arterial é 40 m.

Figura 4 - Distância à Zona 1 e Distância à Zona 2



Fonte - Ayala (2013)

g) Distância da faixa de acesso

Nas versões anteriores, este parâmetro representava a distância, em segundos, a partir das rampas de acesso, em que as faixas laterais são consideradas como faixas de acesso (aceleração). Na versão recente do programa este parâmetro é expresso em metros. Isto é usado para um modelo de *lane-changing* especial aplicado em rampas. Isto significa um diferente critério para determinar se faixas laterais devem ou não ser consideradas como faixas de aceleração associadas a rampas de acesso (faixas de acesso), que pode ser aplicado em diferentes partes da rede. O usuário pode ter controle local do modelo *lane-changing* em rampas de acesso, fazendo o processo de calibração mais fácil. O programa apresenta como valor *default* para a distância da faixa de acesso o comprimento total da faixa lateral (expressão “*whole ramp*”).

h) Velocidade em *yellow box*

Um veículo que está se aproximando de uma interseção com *yellow box* evitará entrar na área da interseção sempre que o veículo precedente estiver se movimentando com uma velocidade menor que este parâmetro, expresso em km/h. O usuário pode desativar o modelo *yellow box* para uma determinada conversão por meio da definição da velocidade no *yellow box* como sendo igual a zero (0). Este parâmetro é definido para cada conversão. Por *default*, todas as conversões existentes na seção terão a velocidade de *yellow box* definida, mas este parâmetro pode ser mudado para qualquer conversão com o uso do editor de interseções. O programa apresenta um valor *default* de 15 km/h em seções relacionadas a redes urbanas e 20 km/h para seções relacionadas com rodovias (Autoestrada, estrada e anel viário).

i) Distância de visibilidade

Quando um veículo está se aproximando de uma interseção através de uma seção que possui o sinal de “dê a preferência” no seu final, o modelo de aceitação de *gap* é aplicado. Este modelo (aceitação de *gap*) será aplicado a partir do momento que o veículo enxerga o final da seção, ou seja, sempre que a distância entre o veículo e o final da seção é menor que a distância de visibilidade em metros. O programa apresenta um valor *default* que varia desde 30 m (para vias de área urbana), 40 m (em rodovias como estradas e anel viário), e 50 m (em autoestradas).

j) Variação do tempo de reação

Indica a variação do atributo “tempo de reação do veículo” em uma dada seção, e é expresso por um valor absoluto inteiro, que aumenta ou diminui o valor do tempo de reação de cada veículo. Este parâmetro é usado para calibrar situações especiais. O valor *default* do programa é zero.

k) Variação do tempo máximo de cessão de preferência

Indica a variação local (na seção considerada) do tempo máximo de cessão de preferência, como atributo do veículo. É um valor absoluto que incrementa ou decrementa o valor do tempo de cessão de preferência do veículo. Este parâmetro é usado para calibração local em situações de “Dê a preferência”. O programa apresenta um valor *default* de 0 s em qualquer caso.

l) Acostamento direito e esquerdo

Presença de acostamento nos dois lados das seções, no lado esquerdo ou no lado direito ou em ambos. O programa apresenta um valor *default* de “nenhum” tanto no lado direito como no esquerdo.

m) Altitude

Usando esta opção de edição, é possível alterar a altitude do primeiro e último ponto diretamente. Pontos intermédios são calculados usando uma interpolação linear quando é marcada a opção “*calculate intermediates*”. O programa calcula todas as seções com altitude zero.

3.2.2. Atributos do veículo

O Aimsun classifica o veículo como privado, pesado e público, esta classificação se torna importante quando se tem faixa exclusiva, para veículos pesados ou para transporte público. O veículo também pode ser classificado em sete tipos de veículos padrão, motorizado ou não, como não motorizado temos a bicicleta e o pedestre, e os motorizados: carro, van, caminhão, taxi e ônibus. Em relação aos pedestres, o programa utiliza um recurso denominado “*Legion*”, onde os pedestres podem ser representados, e interagem com o tráfego, como a travessia da via. Na versão mais recente existem apenas cinco veículos padrão, não é considerado van e bicicleta.

3.2.2.1 Características gerais para cada tipo de veículo

a) Aceitação de velocidade

Este parâmetro é representado pela letra Θ ($\Theta \geq 0$), e pode ser interpretado como o grau de aceitação da velocidade limite pelos condutores dos veículos. Por exemplo, valores de $\Theta > 1$ indicam que o veículo alcançará uma velocidade máxima que é superior à velocidade limite estabelecida para a seção onde ele se encontra, enquanto valores de $\Theta < 1$ indicam que o veículo se deslocará com velocidade menor do que a velocidade limite. Quando $\Theta = 1$ o veículo alcançará uma velocidade máxima igual à velocidade limite estabelecida para a seção.

b) Distância mínima entre veículos

É a distância mínima, em metros, que um veículo mantém entre si e o veículo anterior quando para em fila. O comprimento efetivo do veículo é determinado pela soma do seu comprimento com a distância mínima entre veículos. Quando um único tipo de veículo é usado, o inverso da densidade máxima do fluxo observada na seção é igual à média do comprimento do veículo mais a distância média entre veículos quando estes estão parados em uma fila.

c) Tempo máximo de cessão de preferência

Este parâmetro corresponde ao tempo máximo que o veículo aguarda quando está em uma situação em que deve ceder a preferência de passagem para outros veículos. É o caso, por

exemplo, quando o veículo se encontra em uma interseção controlada pelo sinal “PARE” ou em uma faixa de acostamento aguardando para ingressar em uma rodovia. Este parâmetro é aplicável tanto no modelo de aceitação de *gap* (quando o veículo busca cruzar a via) quanto no modelo de *lane-changing* (quando busca ingressar no tráfego de faixa adjacente). Quando um veículo está paralisado por tempo superior ao estabelecido como “Tempo máximo de cessão de preferência” (em segundos), o condutor do veículo se torna mais agressivo e reduz as margens de aceitação de brechas no fluxo conflitante ou de espaço disponível na faixa para onde deseja se transferir, no caso do modelo de *lane-changing*.

d) Aceitação de ser guiado

Este parâmetro (λ) expresso em porcentagem representa a probabilidade que cada tipo de veículo apresenta de seguir as orientações fornecidas pela sinalização viária, incluindo as provenientes de painéis de mensagens variáveis (PMV), e por sistemas de orientação específicos dos veículos (GPS). Esta probabilidade é apresentada em porcentagem na versão recente do programa e todos os veículos padrão têm como valor *default* 100%

e) Fator de sensibilidade

O modelo *car-following* na versão v6.1, introduz o mínimo *headway* entre o veículo líder e o seguidor como uma nova restrição do componente de desaceleração. Esta restrição é aplicada antes de atualizar a posição e a velocidade do veículo. A versão v6.1 do modelo considera a desaceleração do veículo líder como uma função do parâmetro “a” definido por tipo de veículo, que é denominado “fator de sensibilidade”.

Quando o valor de “a” é menor que 1, o veículo subestima a desaceleração do veículo líder e, como consequência, o veículo torna-se mais agressivo, diminuindo o valor do *gap* entre este e o seguidor. Quando “a” é maior que 1, o veículo sobre-estima a desaceleração do líder e como consequência torna-se cuidadoso, incrementando o *gap* entre este e o seguidor. O valor *default* para todos os tipos de veículos é 1.

f) *Headway* mínimo

Este fator é aplicado pelo modelo *car-following*. Ele garante que o veículo seguidor não se aproxime excessivamente do veículo líder, respeitando o valor mínimo de *headway* definido pelo usuário do programa. O valor *default* no programa é 0 para todos os tipos de

veículos.

3.2.2.2 Características gerais para todos os tipos de veículos

a) Veículos na faixa mais rápida após ultrapassagem

Este parâmetro define a percentagem de veículos que permanecessem na faixa mais rápida em vez de retornar a uma faixa mais lenta após a manobra de ultrapassagem. O programa apresenta um valor 0% como *default*.

b) Ultrapassagem pela direita

Este parâmetro define a percentagem de veículos que usam a faixa mais lenta (faixa da direita) no lugar da mais rápida (faixa da esquerda) para manobras de ultrapassagem. O programa apresenta um valor 0% como *default*.

c) Mudança de faixa imprudente

Este parâmetro define a percentagem de casos em que o veículo realiza a mudança de faixa aceitando *gaps* não seguros. O programa atribui o valor 0% como *default*.

d) Sensibilidade para mudança de faixa imprudente

Este parâmetro é usado na determinação da desaceleração do veículo “a montante,” a fim de produzir um *gap* necessário para que seja executada uma mudança de faixa imprudente. Se o parâmetro for maior do que 1 a desaceleração do veículo a montante é superestimada, e, em consequência, o *gap* será um valor não-real. O programa apresenta um valor 1 como *default*. O parâmetro é adimensional.

e) Veículos equipados

Este parâmetro é a percentagem de veículos que são dotados de equipamentos especiais para detecção específica. Os veículos equipados podem ser detectados por detectores especiais que permitem registrar o momento da detecção (horário), o identificador do veículo (que inclui o seu tipo) e, para os veículos de transporte público, o identificador da linha de transporte público que está sendo realizada. O programa apresenta um valor 0% como *default*.

f) Tolerância de aceleração em velocidade de cruzeiro

Valor definido para a aceleração máxima que um veículo pode adotar para ser considerado como trafegando em velocidade de cruzeiro (velocidade constante). Este valor é utilizado na aplicação do modelo de emissão de poluição. O programa apresenta um valor 0,80 m/s² como *default*.

g) UCPs – Unidades de carro de passeio

Representa a equivalência de cada tipo de veículo em termos de carros de passeio. Ou seja, quantos carros de passeio correspondem à presença de um determinado tipo de veículo na via.

h) Capacidade máxima

Especialmente utilizado em simulações com transporte público, este parâmetro expressa a máxima capacidade do veículo. O programa fornece duas alternativas à escolha do usuário: (i) fator multiplicador de comprimento e (ii) número total de pessoas.

No primeiro caso, o fator multiplicador de comprimento está em relação à capacidade máxima do veículo tipo carro de passeio. No caso de seguir esta opção de trabalho, o programa fornece um valor *default* igual a 1.

Se for habilitada a opção do número total de pessoas, cada tipo de veículo terá um valor característico para sua capacidade máxima em termos de pessoas transportadas. O programa fornece como alternativo *default* a opção fator multiplicador de comprimento.

3.2.2.3 Características dos condutores dos veículos

a) Tempo de reação

É o tempo que leva um condutor para reagir a mudanças de velocidade no veículo precedente. Isto é usado no modelo de *car-following*. O tempo de reação pode ser fixo ou variável. O programa apresenta um valor *default* de 0,75s que são padrão para qualquer tipo de veículo.

b) Tempo de reação de veículo parado

É o tempo que um veículo parado leva para acelerar (reagir) e, assim, iniciar seu

movimento, ante o avanço do veículo líder ou quando as condições para deixar a fila tornam-se favoráveis. É usado só para veículos parados que iniciam movimento a partir dessa condição. A versão anterior do programa (v6.1) apresentava um valor *default* de 1,35 s, que era padrão para todos os tipos de veículo. Na versão recente (v7.0), este valor é característico do tipo de veículo, e o valor *default* para o veículo carro (*default* do programa) é 1,10 s.

c) Tempo de reação do primeiro veículo da fila no semáforo

É o tempo que o primeiro veículo parado em fila leva para iniciar seu movimento (tempo de reação) quando a luz do semáforo muda para verde. A versão anterior do programa (v6.1) apresentava um valor *default* de 1,35 s, que era padrão para todos os tipos de veículo. Na versão recente do programa (v7.0), este valor é característico de cada tipo de veículo. Para o veículo tipo carro o valor *default* do programa é 1,30 s.

d) Probabilidade

Quando se têm dados que possam definir o tempo de reação como variável, estes valores seguem uma função de probabilidade discreta $p=(xi)$ entre 0 e 1, e a somatória das probabilidades é 1. Ele só pode ser definido por tipo de veículo. O programa apresenta um único valor total deste parâmetro igual a 1.

3.2.3 Parâmetros globais da seção

Os parâmetros globais na rede, ou parâmetros do cenário, é um conjunto de dados de entrada do Aimsun, composto por um grupo de parâmetros ligados ao comportamento dos veículos, e não está ligado a tipo de seção e nem de veículo. As manobras dos veículos são modeladas usando os modelos *car-following*, *lane-changing* e aceitação *gap*, todos já comentados anteriormente.

3.2.3.1 Comportamento geral dos veículos

a) Parâmetros do modelo *car-following*

a.1) Estimativa da desaceleração (versão v6.1 – v7.0)

A desaceleração do veículo líder é um dos parâmetros importantes no modelo de *car-following*, para a estimativa da velocidade do veículo seguidor num determinado instante.

Esta desaceleração é estimada pelo programa levando em conta a desaceleração desejada do veículo líder e a do próprio veículo seguidor. Este parâmetro considera a estimação da desaceleração do veículo líder a partir de três alternativas diferentes, e está presente nas três versões recentes do Aimsun. A versão v4.1 considera a desaceleração do líder no processo de *car-following* como igual a desaceleração desejada do veículo líder; a versão v4.2 considera esta desaceleração do líder como a média entre as desacelerações desejadas do seguidor e do líder; e nas versões v6.1 e v7.0 é considerada a desaceleração do líder como uma função de um novo parâmetro “a”, definido pelo tipo de veículo, denominado “fator de sensibilidade”, aplicada sobre o valor da desaceleração desejada do veículo líder.

a.2) *Headway* mínimo (v6.1)

Este parâmetro é considerado no modelo *car-following*, e não está automaticamente habilitado na v6.1; no caso de ser habilitado considerará valores mínimos de *headway* entre o líder e o seguidor. Na versão v7.0 do programa o usuário não define este parâmetro.

a.3) Aplicar o modelo de perseguição (*car-following*) de 2 faixas (v6.1 – v7.0)

O propósito desta variante é considerar a influência de faixas adjacentes no modelo *car-following*, como se observa na Tabela 3-4. Esta opção não está habilitada como *default* no programa. No caso de ser selecionada, são habilitados quatro valores que intervêm no processo desta variante do modelo *car-following*, são eles (i) o número de veículos na faixa adjacente, cujas velocidades afetarão a velocidade do veículo seguidor na faixa considerada; (ii) a distância máxima dos veículos da faixa adjacente ao veículo seguidor da faixa considerada; (iii) a máxima diferença entre a velocidade da faixa considerada e a da faixa adjacente; e (iv) a máxima diferença entre a faixa considerada e a da faixa de aceleração junto a rampas de acesso. Na versão v7.0, no caso de se contar com faixas exclusivas, este modelo fica inabilitado.

a.4) Número de veículos

É o máximo número de veículo dirigindo na faixa adjacente, a frente do veículo seguidor. A Figura 3-9 mostra o gráfico representativo do número de veículos no modelo *car-following* em 2 faixas. Neste exemplo, os veículos no retângulo de linhas tracejadas são os veículos da faixa adjacente, e o veículo seguidor considerado é o que está contido no retângulo de linhas cheias. O programa define como valor *default* para este parâmetro 4 veículos.

a.5) Distância máxima

Só veículos localizados na faixa adjacente a certa distância (distância máxima) medida a partir da posição do veículo seguidor, são tomados em conta para efeito da determinação do impacto da velocidade dos veículos da faixa adjacente sobre a velocidade máxima desejada do veículo seguidor considerado (Figura 3-9). O programa define como valor *default* 100 metros.

Com estes dois parâmetros se apresentam duas circunstâncias, (i) quando a faixa adjacente é uma faixa de aceleração ligada a rampa de acesso (*on-ramp lane*), e (ii) quando a faixa adjacente é qualquer outro tipo de faixa. Para cada caso se define os dois parâmetros adicionais apresentados em (a.6) e (a.7).

a.6) Máxima diferença de velocidades

É a máxima diferença entre a velocidade dos veículos da faixa considerada e da faixa adjacente, expressa em km/h. O programa define como valor *default* 50 km/h.

a.7) Máxima diferença de velocidades considerando faixa de aceleração

É a máxima diferença entre a velocidade dos veículos da faixa considerada e da faixa adjacente quanto esta última é uma faixa de aceleração em rampa de acesso (*on-ramp lane*); é expresso em km/h. O programa define como valor *default* 70 km/h.

a.8) Definição de diferença de velocidade (v6.1)

Habilita duas alternativas de comportamento do modelo *car-following* em 2 faixas, (i) o absoluto e (ii) o relativo. No comportamento absoluto, o veículo da faixa considerada ajusta sua velocidade máxima desejada em função da velocidade dos veículos da faixa adjacente. Já no comportamento relativo, o veículo ajusta sua velocidade de modo a antecipar um movimento de invasão de sua faixa por um veículo mais lento oriundo da faixa adjacente.

b) Parâmetros relacionados ao modelo *Lane-changing*

b.1) Percentagem de ultrapassagem (v6.1) – (v7.0)

É a percentagem de veículos com velocidade desejada maior que a velocidade do líder, e que irão ultrapassá-lo. O programa define um valor *default* de 0.90 (90%).

b.2) Percentagem de retomada (v6.1) – (v7.0)

É a percentagem de veículos com velocidade desejada menor que a velocidade do líder e que irá retornar para a faixa mais lenta. Isto sempre que o veículo líder tenha uma velocidade maior que os veículos seguidores que tentaram ultrapassá-lo e estão na faixa mais rápida. O programa define um valor *default* de 0.95 (95%).

b.3) Modelo de faixa de aceleração (*on-ramp model*) (v6.1)

O modelo *on-ramp* é um modelo especial derivado do modelo de *lane-changing*. É aplicado para veículos que dirigem nas faixas de aceleração de rampas de acesso (*on-ramp lanes*). Baseia-se no parâmetro “distância percorrida na faixa de acesso”, que não é explicitamente definido pelo usuário. Ele é calculado pelo programa em função da versão selecionada pelo usuário para o modelo *lane-changing*, na versão v6.1 dentre três alternativas disponíveis, (i) priorizar o fluxo principal; (ii) modo cooperativo; e (iii) modo cooperativo procurando por brechas à montante. No programa a opção *default* apresentada é o “modo cooperativo procurando por brechas a montante”. Na versão v7.0 este modelo está relacionado diretamente com a mudança de faixa onde a distância de acesso à rampa está definido nos parâmetros da seção, é estendido o modo a aplicar a solicitação de cooperação. O propósito do parâmetro “Distância percorrida na faixa de acesso” é distinguir entre faixas laterais usadas como faixas de aceleração junto a rampas de acesso (*on-ramp*) e as longas faixas laterais que são usadas como faixas lentas ou faixas de ultrapassagem. Nessas últimas faixas, o comportamento será similar ao observado na Zona 1, enquanto que nas faixas de aceleração junto a rampas, o comportamento é similar ao da Zona 3 do *lane-changing*.

b.4) Modelo da Zona de distância (v6.1)

Este parâmetro identifica o procedimento de cálculo da distância para a Zona 1 e da distância para a Zona 2 a ser atribuída a cada veículo. Na versão v6.1 são apresentadas duas alternativas de cálculo. Uma delas, denominada distribuição de velocidade desejada, faz o ajuste da distância informada pelo usuário (em metros) em função da relação entre a velocidade limite da seção e a velocidade máxima desejada pelo veículo. Na alternativa referida como distribuição uniforme, a distância (em metros) é calculada pelo produto da distância informada pelo usuário (em segundos) com a velocidade limite da seção. Na versão v7.0 a alternativa da distribuição de velocidade desejada não está disponível.

Quando se elege a distribuição de velocidade desejada, os veículos mais velozes (com respeito à velocidade limite) têm distâncias de zonas mais curtas do que veículos lentos. Este procedimento indica que nem todos os veículos consideram exatamente o mesmo comprimento de zona.

Quando se elege a distribuição uniforme, o valor das distâncias das zonas, atribuído a cada veículo, é definido a partir de um intervalo de variação do valor calculado, construído com base num valor de percentagem de variação definido pelo usuário. Por exemplo, se a

distância de zona é 100 m e a variação 10%, então o valor da zona variará na faixa de 95 a 105 m.

b.5) Variabilidade da zona de distância (v6.1 - v7.0)

É o valor, expresso em porcentagem, que permite o cálculo do intervalo de variação da zona de distância, na utilização da alternativa da distribuição uniforme, conforme referido na alínea (b.4). Na versão recente do programa (v7.0), só está habilitada esta alternativa. O valor *default* deste parâmetro é 40%.

c) Parâmetros relacionados ao comportamento dos veículos em fila

c.1) Velocidade para considerar a formação de fila (v6.1) – (v7.0)

Os veículos cujas velocidades são reduzidas para valores inferiores a um limite mínimo estabelecido (em m/s) são considerados como parados e, conseqüentemente, formarão filas. Este parâmetro afeta a coleta de dados estatísticos para paradas e filas. O programa apresenta um valor *default* de 1 m/s.

c.2) Velocidade para considerar a dissipação de uma fila (v6.1) – (v7.0)

Os veículos que estão inicialmente parados na fila, e para os quais a velocidade aumenta e assume valores acima de um valor mínimo estabelecido (em m/s), são considerados em condição de movimento e, portanto, deixando a fila. Este parâmetro afeta a coleta de dados estatísticos em paradas e filas. O programa apresenta um valor *default* de 4 m/s.

c.3) Parâmetro referente à antecipação de manobra de conversão (*look-ahead*)

Este parâmetro é o “Número máximo de conversões”, disponível nas versões v6.1 e v7.0 do Aimsun. Consiste no número máximo de conversões permitidas a frente, antes do local da conversão desejada, que o veículo considera como referência para tomar a decisão de mudar de faixa para realizar seu movimento de conversão. O programa apresenta um valor *default* de 2 conversões (valor que o programa define como valor mínimo). Este parâmetro é crítico para evitar que o veículo tente fazer a mudança de faixa muito próximo do local da conversão desejada e não consiga brecha suficiente para realizar esta mudança.

3.2.3.2 Parâmetros referentes ao tempo

a) Intervalo de simulação (v6.1) – (v7.0)

É o intervalo de tempo em que ocorre a atualização do sistema durante a simulação,

também denominado de ciclo. Em cada intervalo de simulação o estado de todos os elementos do sistema, tais como condições dos veículos (posição, velocidade, etc.) e indicações dos semáforos, são atualizados. O intervalo de simulação varia entre 0,1 e 1,0 segundos. O programa apresenta um valor *default* de 0,75 segundos.

b) Tempos de reação

b.1) Tempo de reação (v6.1) – (v7.0)

Este parâmetro, cujo conceito foi mencionado na seção 3.2.2 (Atributos do veículo), subseção 3.2.2.3 (características dos condutores dos veículos), é aplicado agora na rede simulada. No caso de ser fixo, este valor será único para todos os veículos que formam parte do cenário simulado. No caso de ser variável para todos os tipos de veículo do cenário, o usuário pode definir a função de probabilidade discreta para cada tipo de veículo, e a soma das probabilidades deverá ser 1,0. O programa considera o tempo de reação fixo como parâmetro *default*.

b.2) Tempo de reação do veículo parado (v6.1) – (v7.0)

Este parâmetro, cujo conceito foi mencionado na seção 3.2.2 (Atributos do veículo), subseção 3.2.2.3 (características dos condutores dos veículos), é aplicado agora na rede simulada. É usado para os veículos na rede. O programa apresenta um valor *default* de 1,35 segundos para o caso em que o tempo de reação é fixo. Quando o tempo de reação é variável este valor estará sujeito às características de cada tipo de veículo da rede.

O tempo de reação tem uma influência forte no comportamento de descarga de filas e, portanto, dá ao usuário mais controle sobre a modelagem das filas.

b.3) Tempo de reação do primeiro veículo da fila no semáforo (v6.1) – (v7.0)

O programa apresenta um valor *default* de 1,35 segundos no caso do tempo de reação ser considerado fixo. Se for considerado variável, este valor é o valor atribuído para cada tipo de veículo que utiliza a rede.

b.4) Probabilidade (v6.1) – (v7.0)

Este parâmetro, cujo conceito foi mencionado na seção 3.2.2 (Atributos do veículo), subseção 3.2.2.3 (características dos condutores dos veículos), é aplicado agora para a rede simulada.

3.3 PARÂMETROS QUE PODEM SER CALIBRADOS

Levando em consideração as tabelas de parâmetros a serem calibrados do Aimsun (AYALA,2013), com seus respectivos valores *default*, verifica-se que existem 60 parâmetros, na versão v7.0, que podem ser calibrados pelo usuário do programa. Pelo número elevado de parâmetros, observou-se que o simulador não era sensível a alguns parâmetros. A partir de um estudo conceitual de cada parâmetro que Ayala (2013) realizou, foi selecionado inicialmente um total de 37 parâmetros como sendo potencialmente importantes para o propósito de sua pesquisa. A pesquisadora, ainda analisou os parâmetros inicialmente selecionados em conjunto com resultados de pesquisas sobre calibração, em especial com o trabalho de Hourdakis (2003), que identifica oito parâmetros como sendo importantes no processo: a Máxima diferença de velocidade, a Máxima diferença de velocidade em faixa de aceleração (*on-ramp*), a Aceleração máxima, a Máxima velocidade desejada, a Porcentagem de retomada, a Porcentagem de ultrapassagem, a Aceleração normal, e o Tempo de reação.

Partindo dessa análise, Ayala (2013) identifica o conjunto de parâmetros da versão v7.0 do Aimsun, o qual é significativo para o trabalho realizado pela pesquisadora. Este conjunto é formado por 24 parâmetros, que serão apresentados logo a seguir.

A investigação profunda de cada parâmetro permitiu identificar quais deles afetam o processo de calibração, ou seja, o programa se mostra sensível à calibração de alguns parâmetros, tanto em nível geral quanto em condições específicas do cenário a ser simulado.

3.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO

Os microssimuladores em geral, após o processo de simulação, trazem como dado de saída medidas de desempenho, que podemos defini-la como a qualificação de uma ação, um valor dado a uma grandeza, o qual servirá como referencial para comparação. O simulador Aimsun, o qual foi utilizado nesta pesquisa, traz várias medidas de desempenho, como fluxo, velocidade, densidade, tempo de viagem, atraso, tempo de espera, entre outras. Ao fazer a modelagem, o usuário pode escolher quais medidas de desempenho é importante ser considerada, lavando em consideração sua rede, as medidas de desempenho do Aimsun totalizam 12 medidas.

Ayala (2013), pela magnitude de seu trabalho, selecionou duas medidas de desempenho, tempo médio de atraso e comprimento médio de fila.

a) Tempo médio de atraso

O tempo médio de atraso está ligado ao comportamento do veículo antes de chegar à interseção, esse tempo é uma relação entre o tempo que um veículo levaria de um ponto A ao B qualquer andando na velocidade da via, com o tempo que ele realmente se desloca entre esses pontos.

Segundo TSS (2012), para a determinação do tempo médio de atraso, é necessária a aplicação das três formulas abaixo:

- Estatística na rede

Levando em consideração os veículos que deixam a rede:

$$DTi = \left(\frac{TDTi}{Di} \right) \times 1000 \quad (3.1)$$

Onde:

DTi = tempo médio de atraso por quilômetro de *i-th* veículo (s);

TDTi = tempo total de atraso acumulado em cada seção pelo *i-th* veículo (s);

Di = distância total de viagem realizada pelo veículo *i-th* na rede (m).

Atuando na rede:

$$DTsys = \frac{\sum_{i=1}^{Nsys} DTi}{Nsys} \quad (3.2)$$

Onde:

DTsys = tempo médio de atraso por veículo por quilômetro (s/km);

DTi = tempo médio de atraso por quilômetro de *i-th* veículo (s)

Nsys = número de veículos que saíram da rede durante o período I;

I = intervalo estatístico, tempo em que os resultados da simulação são registrados e varia até chegar ao tempo total de simulação (s)

- Estatísticas na ação

$$DTi = TTi - [(Ls/Min SMaxi) + (Lt/ Min SMaxi)] \quad (3.3)$$

TTi = tempo médio de viagem na seção do veículo (s);

Ss = velocidade limite da seção s (m/s);

St = velocidade limite da conversão t (m/s);

θ_i = aceitação de velocidade do veículo i ;

SM_{maxi} = máxima velocidade desejada do veículo i (m/s);

L_s = comprimento da seção s (m)

L_t = comprimento da conversão t (m)

b) Comprimento médio das filas

O comprimento médio das filas, é medido através do comprimento de fila que se forma a partir do primeiro carro a parar frente à sinalização, seja ela uma placa de PARE ou um semáforo.

Para determinação desta medida, são utilizadas duas equações:

Para conversões:

$$AQL_{tur} = \frac{\sum_{t_i \in T_I} [QL_{l,t(i-1)} - (t_{l,t} - t_{l,(l-1)})]}{NBLanes_{tur} \left[\frac{1}{NBTurns_l} \right]} \quad (3.4)$$

Onde:

$t_{l,i} = (0, t_{l,1}, \dots, t_{l,m}, I)$: instantes “ t ” quando o comprimento da fila na faixa “ l ” muda, no intervalo de 0 a I ;

AQL_{tur} = comprimento médio de fila na conversão;

$QL_{l,t}$ = comprimento de fila na faixa “ l ” no tempo “ t ” (veí);

$NBTurns_l$ = número total de movimentos na conversão na faixa “ l ” durante o período I ; $NBLanes_{tur}$ = número de faixas antes da conversão;

Para a seção:

$$AQL_{SEC} = \frac{\sum_{l \in SEC} (\sum_{t_1 \in T_1} [QL_{l,t(t-1)} * (t_{i,j} - t_{l,(i-1)})]) / I)}{NBLanes_{sec}} \quad (3.5)$$

Onde:

AQL_{sec} = comprimento médio de fila para a seção;

$QL_{l,t}$ = comprimento de fila na faixa “ l ” para o tempo “ t ” (veí);

I = intervalo estatístico (seg)

$t_{l,i} = (0, t_{l,1}, \dots, t_{l,m}, I)$: instantes “ t ” quando o comprimento da fila na faixa “ l ” muda, no intervalo de 0 a I ;

$NBLanes_{sec}$ = número de faixas da seção “ sec ”.

- Para a rede:

Na rede o comprimento médio de filas é calculado como a soma do comprimento médio de filas em todas as seções e nas conversões.

4. PROCEDIMENTO REALIZADO POR AYALA (2013) PARA A IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS A SEREM CONSIDERADOS NA CALIBRAÇÃO.

Ayala (2013) realizou um procedimento para a identificação de parâmetros que influenciam, de forma destacada, o processo de simulação microscópica a partir de revisões bibliográficas que falam sobre calibração de microsimuladores. O objetivo geral do estudo da autora foi encontrar um conjunto de parâmetros importantes no processo de simulação, relacionado aos tipos de cenários mais comuns em áreas urbanas. O procedimento é composto de oito etapas e o seu objetivo específico é a identificação de dois conjuntos de parâmetros: o primeiro diz respeito a todo tipo de cenário, ou seja, trata-se de um conjunto de parâmetros globais, e o segundo volta-se para cenários com características específicas.

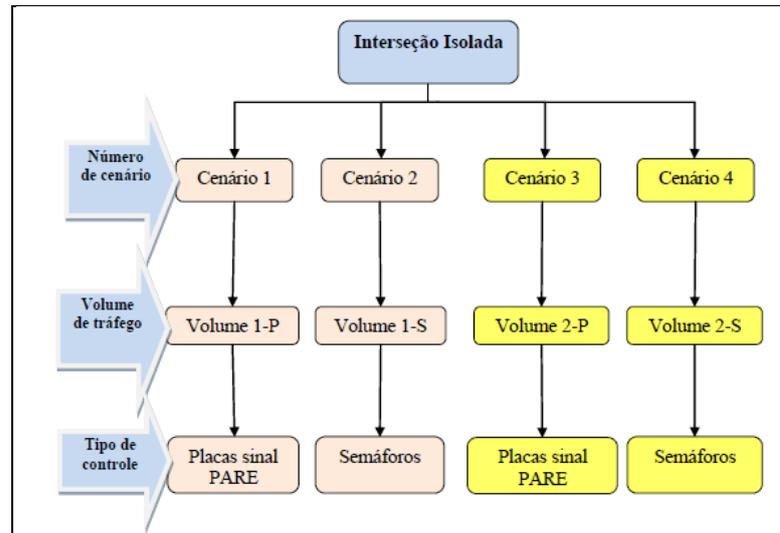
4.1 PRIMEIRA ETAPA: DEFINIÇÃO DA SITUAÇÃO A SER ESTUDADA

Nesta etapa foi identificado o propósito da simulação microscópica, por exemplo: a avaliação de um projeto de semaforização²; a análise de riscos de acidentes; entre outros. Aqui também foram identificados às características gerais no cenário a ser estudado.

Com o propósito de avaliar o desempenho do tráfego veicular, foram escolhidos 12 (doze) cenários em área urbana, levando em consideração algumas medidas de desempenho determinadas. Assim, a pesquisa deu início com uma intersecção isolada e passou por duas pequenas redes arteriais, com quatro intersecções cada uma delas. Das situações estudadas puderam-se obter parâmetros importantes para a calibração do simulador Aimsun. Na figura abaixo estão apresentados os quatro cenários propostos para a intersecção isolada, todos com características físicas e geométricas semelhantes, porém, com variações relacionadas ao volume e tipo de controle de tráfego (placa PARE ou semáforo).

² Semaforização: instalação de semáforos em rua, cruzamento ou entroncamento.

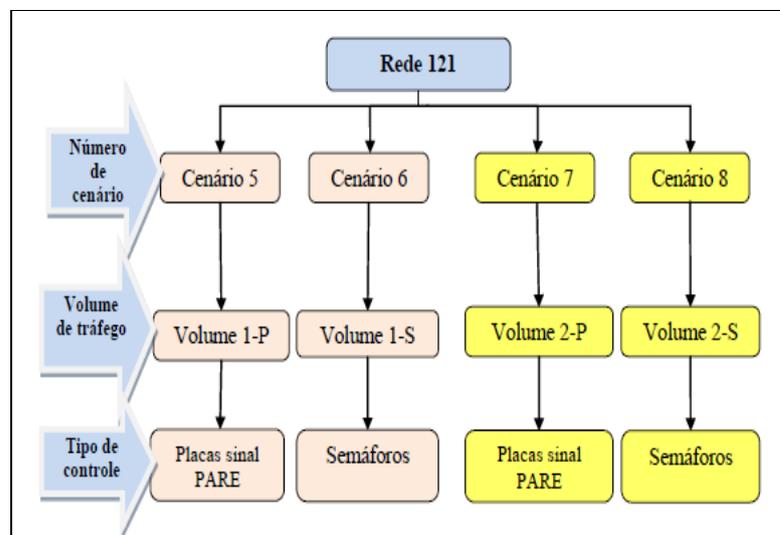
Figura 5 – Configuração do cenário para intersecção isolada



Fonte: Ayala (2013)

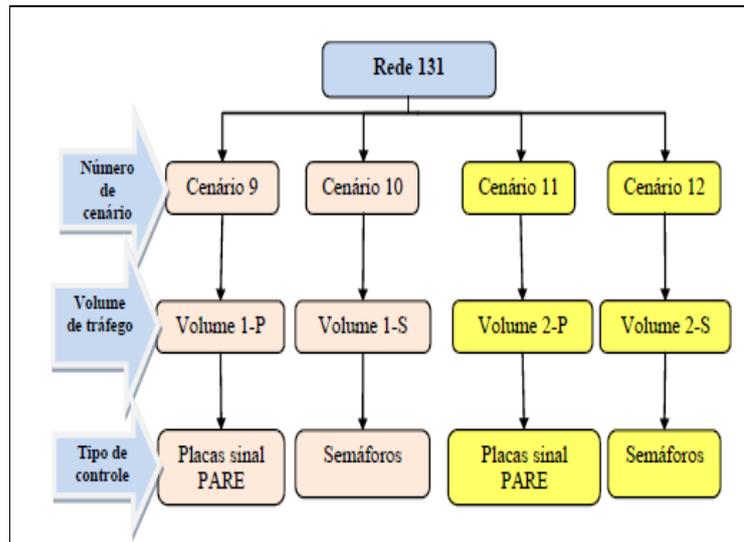
A figura 6 e a figura 7 apresentam tanto os quatro cenários estudados para as redes arteriais, denominadas por Ayala “Rede 121” e “Rede 131” consecutivamente como a variação do volume e tipo de controle de tráfego.

Figura 6 – Configuração do cenário para rede arterial (Rede 121)



Fonte: Ayala (2013)

Figura 7 – Configuração do cenário para rede arterial (Rede 131)



Fonte: Ayala (2013)

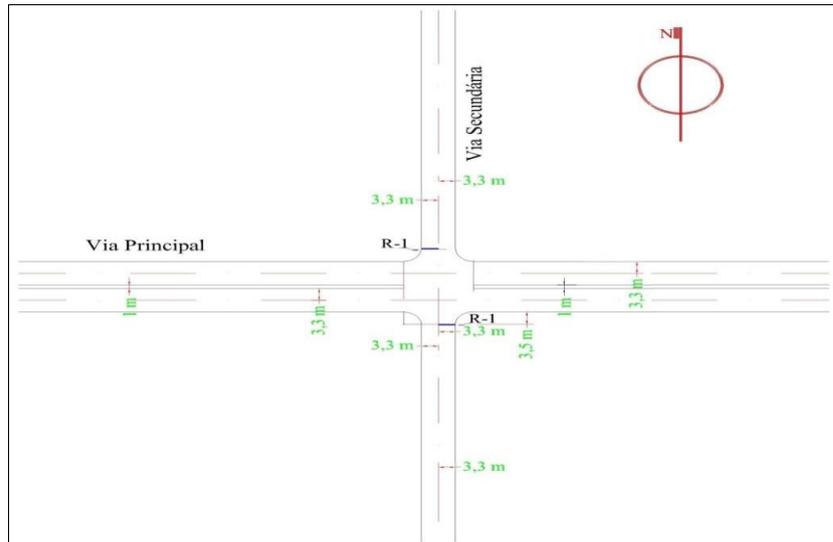
4.2 SEGUNDA ESTAPA: CONDIÇÕES GERAIS DO CENÁRIO

Nesta etapa, foram definidas as características principais dos elementos dos cenários que serão simulados, tendo como ponto principal a definição da geometria da via. Partindo destas informações, foram criados dois grupos de cenários com características semelhantes: a intersecção isolada e as redes arteriais.

4.2.1 Intersecção isolada

A intersecção isolada foi considerada nos quatro primeiros cenários e é composta pela intersecção de uma via principal com duas faixas de rolamento de sentido único, e uma via secundária com uma faixa de rolamento de duplo sentido de fluxo de tráfego. As orientações estão representadas na figura 8. O comprimento de estudo adotado para todas as seções é de 500 m, para permitir a observação do comportamento dos condutores dos veículos.

Figura 8 – Interseção Isolada para os cenários 1 e 3



Fonte: Ayala (2013)

A Figura 8 apresenta a configuração geométrica tipo para os quatro primeiros cenários de interseção isolada, mostrando as aproximações das vias secundárias controladas pelo sinal PARE (sinal R-1 do Código de Trânsito Brasileiro).

Para cenários com o mesmo tipo de controle do tráfego, a autora assumiu um estado inicial denominado “Volume 1” (Volume 1-P, para o controle com o sinal PARE e Volume 1-S, para o controle com sinalização semafórica) e um segundo estado denominado “Volume 2” (Volume 2-P, para o controle com o sinal PARE e Volume 2-S, para o controle com sinalização semafórica).

4.2.2. Redes Arteriais

Os cenários 5,6,7 e 8 apresentam as configurações características das redes arteriais agrupadas, pela autora, na “Rede 121”, constituída por uma via principal com quatro intersecções e três seções intermediárias.

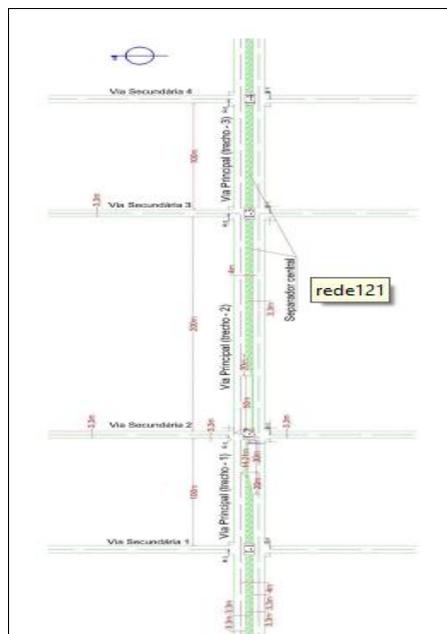
A característica principal da geometria da rede destes cenários é o comprimento das seções intermediárias, que é de 100, 200 e 100 metros. Quanto ao controle do tráfego nas intersecções, enquanto os cenários 5 e 7 representam intersecções controladas pelo sinal PARE, as intersecções dos cenários 6 e 8 são controladas por sinalização semafórica.

Os cenários 9, 10, 11 e 12 seguem as configurações da “Rede 131”, mencionados no trabalho a qual se refere, constituído por uma via principal com quatro intersecções e três

seções intermediárias. A característica principal da geometria da rede destes cenários é o comprimento das seções intermediárias, que é de 150, 300 e 150 metros.

Os Cenários 9 e 10 apresentam volume de tráfego inicial para os dois tipos de controle considerados (Volume 1-P ou Volume 1-S) e os Cenários 11 e 12 apresentam outro volume de tráfego para esses mesmos controles (Volume 2-P ou Volume 2-S). As interseções dos Cenários 9 e 11 são controladas pelo sinal PARE, enquanto as dos Cenários 10 e 12 são controladas por sinalização semafórica.

Figura 9 – Rede arterial 121 para os cenários 5 e 7 (Ayala, 2013)



Fonte: Ayala (2013)

4.3 TERCEIRA ETAPA: CARACTERIZAÇÕES DOS CENÁRIOS

Nesta etapa, foi detalhada a característica específica de cada um dos dois grupos de cenário simulados. Para todos os cenários foram definidos os tipos de controle, a composição de fluxo de tráfego e o volume de veículos. Para todos os cenários a composição do fluxo se limita a um tipo de veículo, o carro de passeio.

Para a presente pesquisa, tem-se interesse apenas na intersecção isolada, assim falaremos apenas da caracterização dos cenários 1, 2, 3 e 4, porém, Ayala (2013) propôs a caracterização para o restante dos cenários.

4.3.1 Interseção Isolada

Nos cenários que simulam a interseção isolada têm-se duas alternativas de controle de tráfego, a primeira mediante o uso de placas de sinal PARE nos Cenários 1 e 3; e a segunda mediante semáforos nos Cenários 2 e 4.

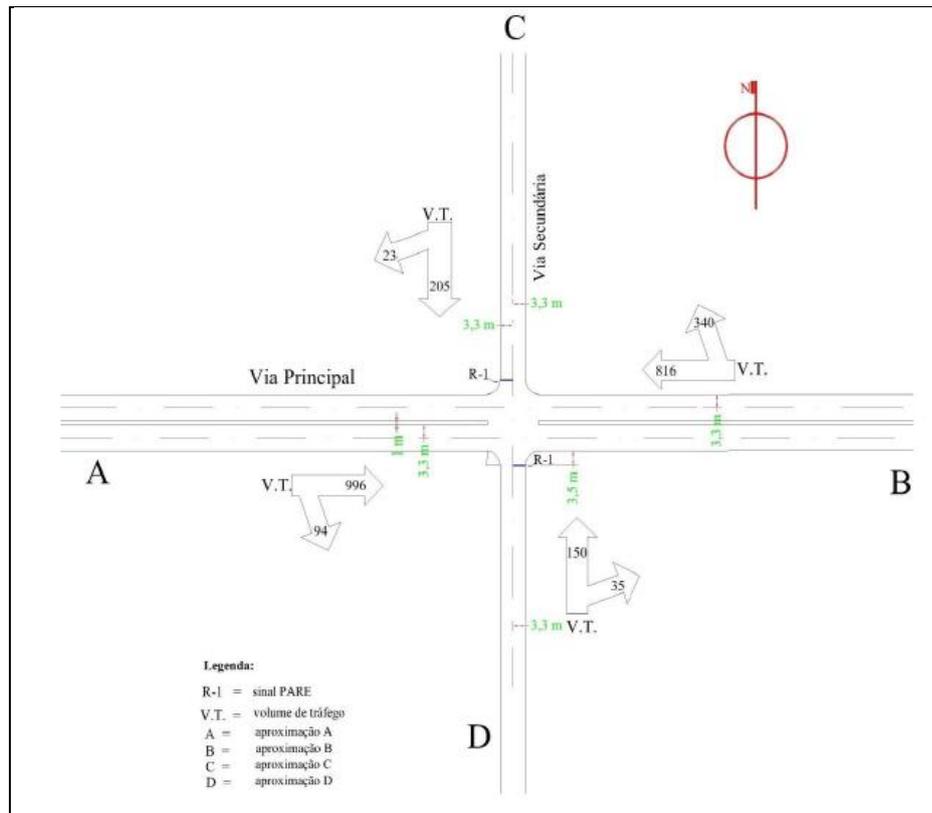
O uso de placas de sinal “Parada obrigatória” (R-1) foi definido a partir da consideração de que as condições de visibilidade nas aproximações da via secundária não recomendam o uso do sinal “Dê a Preferência” e que a utilização de controle semafórico não é justificada. A posição das placas com esses sinais na via secundária está a 3,50 metros do bordo da via principal, e elas estão acompanhadas por uma linha de retenção regulamentada. No caso das interseções isoladas controladas por semáforos, a pesquisadora fez o cálculo de tempos de ciclo semafórico, considerando o procedimento de *Webster* e o procedimento do Grau de Saturação.

Assim, Ayala (2013), para facilitar o processo de alocação do volume de veículos em cada aproximação, expresso em veículos por hora (vph), e o posterior cálculo dos tempos semafóricos, adotou uma representação de cada aproximação pelas seguintes letras maiúsculas: “A” para a aproximação da via principal no sentido oeste-leste; “B” para a aproximação da via principal no sentido leste-oeste; “C” para aproximação da via secundária no sentido norte – sul; e “D” para a aproximação da via secundária no sentido sul – norte. A Figura 10 apresenta estas aproximações.

A distribuição de volumes de tráfego tem variações para uma mesma geometria e mesmo tipo de controle do tráfego. Assim, o Cenário 1 e o Cenário 3 têm a mesma configuração geométrica, mesmo tipo de controle de tráfego, mas os volumes nas interseções são distintos, de modo a permitir verificar o impacto da variação do volume de tráfego sobre o resultado da análise dos parâmetros. A variação do volume de tráfego para estes cenários foi de aproximadamente 50%. O mesmo procedimento foi adotado com relação aos Cenários 2 e 4, sendo que nesse caso a variação do volume de tráfego foi de aproximadamente 40%.

A Tabela 1 apresenta o volume dos veículos por aproximação em cada cenário simulado para a intersecção isolada.

Figura 10 – Distribuição do volume de tráfego e aproximações



Fonte: Ayala (2013)

Tabela 1 – Distribuição do volume de veículos na interseção

Cenário	Características gerais			Volume de tráfego (vph)					total na interseção
	ambiente	veículo tipo	tipo de controle	aproximação	esquerda	frente	direita	total	
1	Interseção Isolada	carro	placas PARE	A	0	996	94	1090	2659
				B	0	816	340	1156	
				C	0	205	23	228	
				D	0	150	35	185	
3	Interseção Isolada	carro	placas PARE	A	0	508	42	550	1742
				B	0	712	67	779	
				C	0	205	23	228	
				D	0	150	35	185	
2	Interseção Isolada	carro	semáforos	A	0	996	94	1090	2855
				B	0	816	340	1156	
				C	0	205	23	228	
				D	0	342	39	381	
4	Interseção Isolada	carro	semáforos	A	0	1394	131	1525	3874
				B	0	1142	476	1618	
				C	0	246	28	274	
				D	0	410	47	457	

Fonte: Ayala (2013)

4.4 QUARTA ETAPA: ESTABELECIMENTOS DAS MEDIDAS DE DESEMPENHO

Como já comentado no item 3.4, Ayala (2013) assumiu as medidas de desempenho: “Tempo Médio de Atraso” e “Comprimento Médio das Filas”. Apesar de essas medidas serem obtidas para cada faixa, por seção e por rede, a autora propôs considerar apenas os resultados médios da rede.

4.5 QUINTA ETAPA: DEFINIÇÕES DO CONJUNTO DE PARÂMETROS E DOS SEUS RESPECTIVOS VALORES

A partir dos parâmetros do Aimsun e da revisão bibliográfica, Ayala (2013) obtém 24 parâmetros qualificados como potencialmente importantes para a calibração do programa, ou seja, que têm maior impacto nos resultados da simulação. São eles:

- Parâmetro 1: Máxima variabilidade do tempo de “Dê a preferência”;
- Parâmetro 2: Distância Zona 1;
- Parâmetro 3: Distância Zona 2;
- Parâmetro 4: Distância faixa de aceleração (*on-ramp*);
- Parâmetro 5: Distância de visibilidade;
- Parâmetro 6: Variação tempo de reação;
- Parâmetro 7: Velocidade máxima desejada;
- Parâmetro 8: Aceleração máxima;
- Parâmetro 9: Desaceleração normal;
- Parâmetro 10: Desaceleração máxima;
- Parâmetro 11: Distância mínima entre veículos;
- Parâmetro 12: Tempo máximo de cessão de preferência;
- Parâmetro 13: Fator de sensibilidade;
- Parâmetro 14: Mínimo *headway*;
- Parâmetro 15: Ultrapassagem pela direita;
- Parâmetro 16: Mudança de faixa imprudente;
- Parâmetro 17: Sensibilidade para mudança de faixa imprudente;

- Parâmetro 18: Número de veículos;
- Parâmetro 19: Máxima diferença de velocidade;
- Parâmetro 20 Máxima diferença de velocidade em faixa de aceleração (*on-ramp*);
- Parâmetro 21: Porcentagem de ultrapassagem;
- Parâmetro 22: Porcentagem de retomada;
- Parâmetro 23: Tempo de reação do experimento; e
- Parâmetro 24: Tempo de reação do veículo.

Cada parâmetro teve uma variação de valor definida em torno do valor *default* (valores inferiores e superiores). Esta definição resultou em três valores que foram comparados entre si para cada parâmetro, (i) um valor abaixo do valor *default*, (ii) o valor *default*, e (iii) um valor acima do valor *default*.

As variações de valores, denominadas “*dx*”, representam uma variação diferencial do valor *default*. O valor dessa variação levou em conta os limites máximos e mínimos de variação do valor *default*, quando definidos no manual do simulador, de modo que os valores a serem testados se encontram nesta faixa. Assim, se o simulador definisse valores máximos e mínimos para o parâmetro, o valor de “*dx*” seria igual ao menor valor obtido para as diferenças (valor *default* – valor mínimo) e (valor máximo – valor *default*). No caso do simulador Aimsun, por exemplo, têm-se algumas características próprias dos veículos que apresentam valores mínimos e máximos. Os valores de “*dx*” obtidos para esses parâmetros, quando expressos em termos percentuais do valor *default*, dão uma ideia de variação que poderá auxiliar na definição da variação “*dx*” para outros parâmetros (Ayala, 2013).

4.6 SEXTA ETAPA: SIMULAÇÕES DOS CENÁRIOS

Nesta etapa foi realizada a simulação de todos os parâmetros identificados na quinta etapa. A lógica de simulação seguiu da seguinte forma: para o primeiro cenário foi feita uma primeira simulação com todos os parâmetros nos seus valores *default*. Em seguida, para o primeiro parâmetro a ser testado, foi feita uma simulação com o seu valor *default* diminuído em um *dx*, sendo mantidos os valores *default* para o resto dos parâmetros. Por último, foi realizada outra simulação com o mesmo parâmetro, onde seu valor *default* foi incrementado em um *dx*, sendo mantidos os demais parâmetros com seus valores *default*. Na sequência, e

seguindo a mesma lógica, foram testados todos os parâmetros para cada um dos 12 cenários referidos na Etapa descrita no item 4.1.

4.7 SÉTIMA ETAPA: ANÁLISE ESTATÍSTICA SOBRE A SIGNIFICÂNCIA DE CADA PARÂMETRO SOBRE O RESULTADO DA SIMULAÇÃO

Nesta etapa foi realizado o teste estatístico para identificar a significância de cada parâmetro sobre os resultados da simulação de cada cenário. Para cada cenário considerado, representando uma determinada situação física da via sob condições de tráfego específicas, Ayala (2013) seguiu os seguintes passos:

a) *Passo 1*: Realização do experimento para o primeiro parâmetro com a geração de três conjuntos de dados referentes aos valores *default*, menor e maior que o *default* do parâmetro. Cada conjunto apresenta 30 ou mais observações obtidas por meio de simulações independentes da situação considerada. Para os demais parâmetros, a autora realizou dois experimentos com a geração de dois conjuntos de dados referentes aos valores menores que o *default* e maiores que o *default*. O experimento inicial realizado para o primeiro parâmetro, onde ele e os demais assumem o valor *default*, gerou um conjunto que foi utilizado na análise de todos os parâmetros selecionados para o estudo. Isto é, a análise de cada parâmetro foi feita com base em três conjuntos de dados;

b) *Passo 2*: Análise dos dados dos três conjuntos obtidos para as medidas de desempenho consideradas no estudo, associadas aos três valores estudados para cada parâmetro avaliado, com relação à normalidade da distribuição dos seus valores (30 ou mais valores em cada conjunto);

c) *Passo 3*: Análise para testar a igualdade da variância dos três conjuntos sob os aspectos da medida de desempenho e do parâmetro analisado.

d) *Passo 4*: Comparação entre os resultados das médias dos três conjuntos usando ANOVA³, possibilitando assim, determinar a significância da variação dos valores de cada parâmetro sobre as medidas de desempenho selecionadas, para as quais os três conjuntos de dados são normalmente distribuídos e as variâncias não são estatisticamente diferentes entre si. Para as medidas de desempenho cujos três conjuntos não satisfizeram as condições de

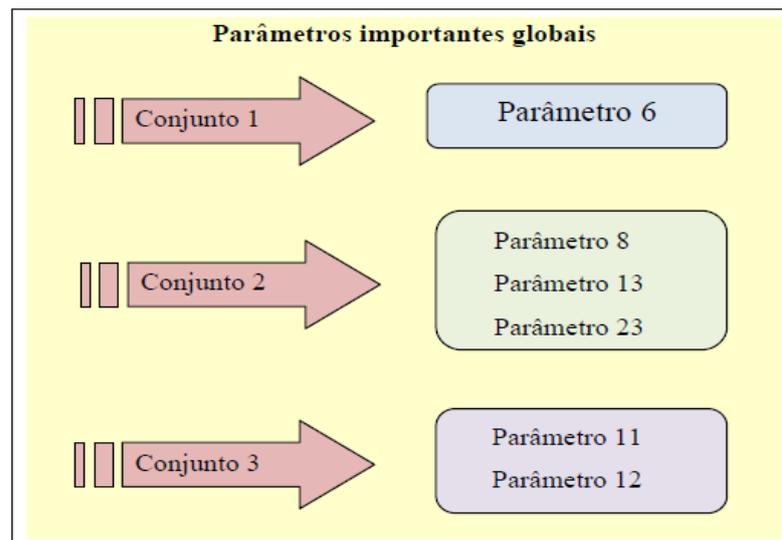
³ ANOVA: Teste de variância de médias.

normalidade e de igualdade de variâncias, a comparação entre os resultados obtidos deve ser feita por meio de testes não paramétricos.

4.8 OITAVA ETAPA: IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS

A partir da aplicação do procedimento realizado por Ayala (2013) foi obtido um grupo de parâmetros considerados influentes em todos os cenários simulados, levando em conta as medidas de desempenho selecionadas, “tempo médio de atraso” e “comprimento médio das filas”. A variação deste grupo de parâmetros influencia diretamente nos resultados da simulação (medidas de desempenho). Assim a pesquisa é concluída com dois quadros de grupos de parâmetros, o primeiro (figura 11) é a identificação em termos globais, o segundo (figura12) leva em consideração o tipo de controle de tráfego (placa PARE, e semáforo)

Figura 11 – Conjunto de parâmetros para os 12 cenários

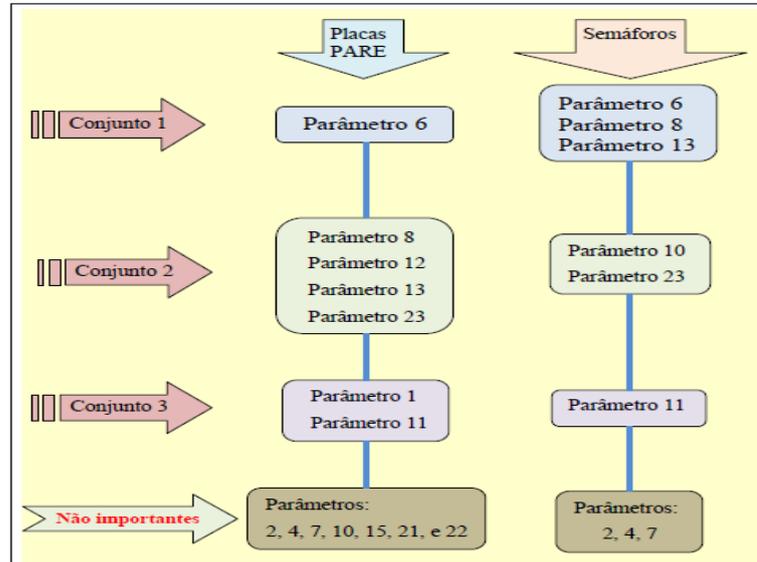


Fonte: Ayala (2013)

Analisando a figura acima, é possível notar que a pesquisa apontou que o parâmetro 6 (variação do tempo de reação) se destaca pela sua importância no processo de calibração do conjunto 1, uma vez que sua variação afetou o resultado das duas medidas de desempenho para todos os cenários estudados. O segundo conjunto teve importância para 75% a 99% dos cenários dos estudados, e englobam os parâmetros 8, 13 e 23, aceleração máxima, distância mínima entre veículos e tempo de reação respectivamente. Para o conjunto 3, com os

parâmetros 11 e 12, a distância mínima entre os veículos e tempo máximo de cessão de preferência, é importante em 50% até 74% dos cenários.

Figura 12 – Conjunto de parâmetros importantes para cenários com controle de tráfego



Fonte: Ayala (2013)

5. ESTUDO DE CASO

5.1 INTRODUÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Segundo Vilarinho (2008), o primeiro passo de uma simulação de tráfego é a definição do cenário a ser estudado. Para o presente estudo de caso considerou-se as condições gerais dos cenários propostos por Ayala (2013). Entre os três cenários apresentados pela autora no capítulo anterior, um se mostrou mais apropriado ao presente estudo de caso: a Interseção Isolada. Tal estudo considerou os tipos de controle e volume de tráfego e a composição do fluxo.

Ainda segundo o mesmo autor, é fundamental esclarecer as razões que tornam a análise de um estudo de caso necessária e definir as repostas que se pretende encontrar através de uma simulação de tráfego. Para tanto, o objetivo desta pesquisa é calibrar um conjunto de variáveis que influenciam significativamente a simulação, tendo como ponto partida a comparação entre as medidas de desempenho obtidas em campo e as dadas pelo Aimsun como dado de saída.

A metodologia adotada para o estudo de caso é a mesma adotada por Ayala (2013), no capítulo anterior, porém das oito etapas adotadas pela autora duas serão desconsideradas por não ir ao encontro com o objetivo da presente pesquisa. As etapas desconsideradas estão explicitadas nos itens 4.7 e 4.8 do capítulo anterior, “Análise Estatístico sobre a Significância de cada Parâmetro sobre o Resultado do Simulador” e “Identificação dos Principais Parâmetros”, respectivamente.

5.2 IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DO CENÁRIO DE ESTUDO

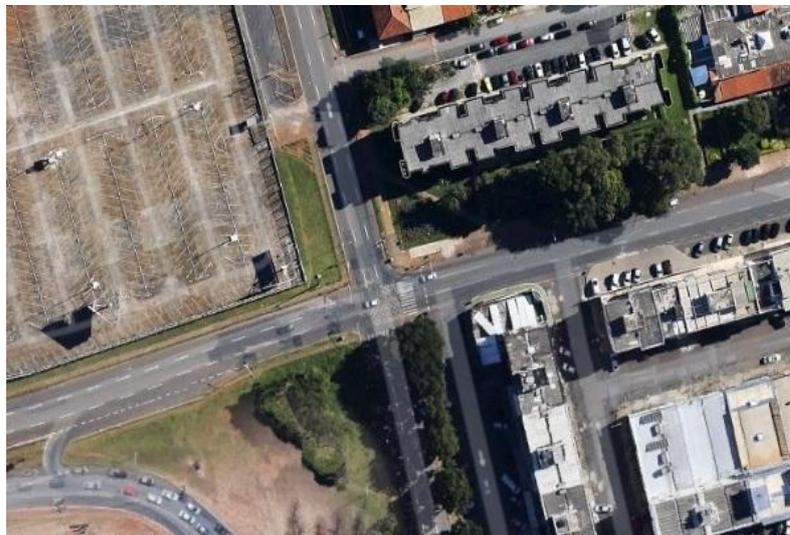
A interseção isolada a ser estudada se trata de um cruzamento semaforizado localizado na via W4 norte, na altura da Quadra 707, Asa Norte, em Brasília/DF. O Plano Piloto de Brasília é referência de arquitetura e urbanismo no Brasil. Trata-se de uma área planejada, dividida em quadras e setores, com uma rede viária com poucas intersecções e predominância de rotatórias, facilitando o fluxo de veículos. Grande parte das intersecções existentes no Plano Piloto são semaforizadas, sendo poucas as exceções. O fluxo é composto praticamente por carros de passeio e motocicletas.

5.2.1 Dados Geométricos

O microsimulador Aimsun requer como dados de entrada a geometria da rede. Nas intersecções o principal interesse é a largura e o comprimento da via, a velocidade máxima permitida, os ângulos e os movimentos que são permitidos aos veículos.

Essas informações foram obtidas através de fotos aéreas disponibilizadas pelo Google Earth datado de setembro de 2014. Nos demais estudos os dados geométricos podem ser obtidos também por desenhos em formato digital (DWG, ArcGIS, etc.)

Figura 13 – Intersecção Isolada – Via W4 Norte altura da Quadra 707



Fonte: Fotografia aérea - Google Earth

5.3 CONDIÇÕES GERAIS DO CENÁRIO

5.3.1 Tipos de Controle

Segundo Vilarinho (2008), os elementos mais usuais de regulamentação de prioridade de passagem em intersecções são os sistemas de sinalização luminosa, ou semáforo, sendo este, o mesmo utilizado na intersecção isolada escolhida para o presente estudo de caso. Ainda segundo o mesmo autor, cada conjunto de sinais luminosos obedece a um ciclo dividido em três fases: o sinal luminoso verde dá a permissão de avançar; o amarelo é a transição de uma fase para outra; e o vermelho é tempo de limpeza.

Para a intersecção isolada em questão foram cronometrados os parâmetros referentes aos sinais luminosos verde, amarelo e vermelho, apresentados na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 – Ciclos dos sinais luminosos

CICLO DOS SINAIS LUMINOSOS (segundos)		
Sinal Luminoso	Via Principal	Via Secundária
Verde	60	40
Amarelo	3	3
Vermelho	45	65

Fonte: Dados obtidos da pesquisa

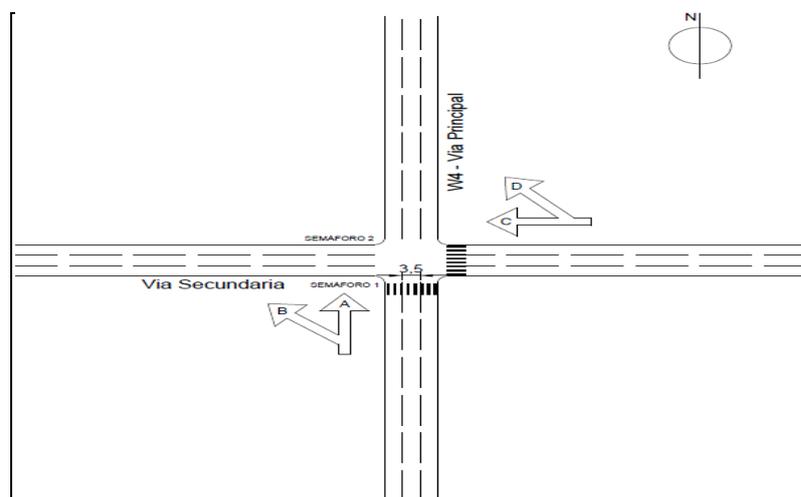
5.3.2 Composição do fluxo

A composição do fluxo diz a respeito à definição dos tipos de veículos que compõem o tráfego. Cada veículo tem uma característica física como comprimento, largura e velocidade, etc. A intersecção estudada se limita a um tipo de veículo: o carro de passeio.

5.3.3 Volume de Tráfego

Para definir o volume de tráfego (veículos por hora - vph) da área em questão, o estudo teve como base a proposta de Ayala (2013) apresentado no item 4.3. Assim, adotou-se representar cada aproximação pelas seguintes letras: “A” para a aproximação da via principal no sentido sul-norte; “B” para a conversão da via principal para a secundária no sentido sul-oeste; “C” para aproximação da via secundária no sentido leste-oeste; e “D” para a conversão da via secundária para a principal no sentido leste-norte.

Figura 14 – Representação da Intersecção Isolada



Fonte: Dados obtidos da pesquisa

Antes da contagem de veículos, com o objetivo de pesquisar o volume de carros e determinar o horário ideal⁴ para este estudo, foi necessário acessar a base de dados do Detran/DF do semáforo localizado na via principal. Assim, coletou-se o volume real na zona de estudo, com o auxílio e uma câmera filmadora, instalada em um local estratégico para a visualização de todas as vias que compõe a intersecção.

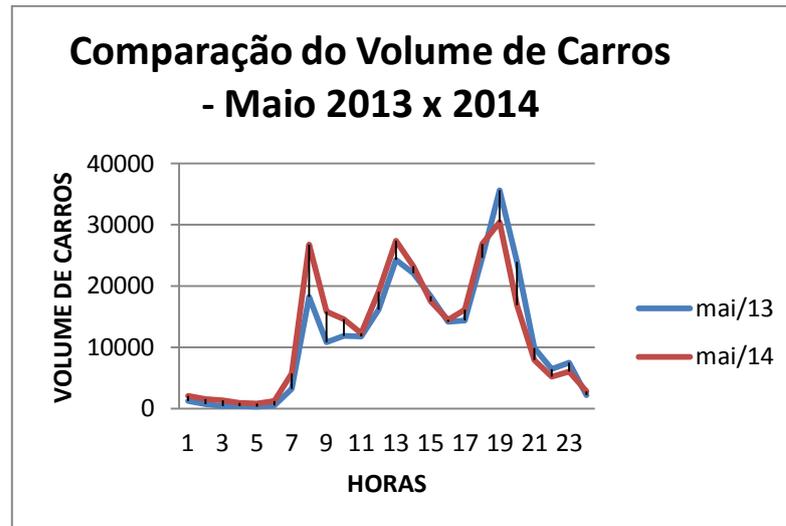
A coleta de dados foi realizada em setembro de 2014. Porém, neste ano foi promovida em Brasília a Copa do Mundo, evento que gerou um fluxo atípico de veículos quando comparados aos anos anteriores. Assim, optou-se excluir deste estudo os meses de junho e julho. Também foi excluído o mês de agosto por seus dados ainda não estarem disponíveis para consulta. Portanto, levantaram-se os dados de maio de 2013, maio de 2014 e setembro de 2013

Com os dados em mãos, foi feita uma comparação entre os meses de maio de ambos os anos, para análise de crescimento do número de veículos. A partir de análise do gráfico 1 é possível observar que o aumento de volume de veículos naquele cruzamento entre os anos de 2013 e 2014 foi significativo, mesmo assim, tomamos como base de referência para este estudo o mês de setembro de 2013, devido o ano de 2014 ser atípico.

No capítulo anterior foi apresentada uma tabela com a distribuição do volume de veículos em uma intersecção do estudo proposto por Ayala (2013). Com o objetivo de partir de uma base já definida na pesquisa da autora, para o semáforo como tipo de controle de tráfego, adotou-se a situação dois, em que o volume de carros na via principal (aproximação A) foi de 1090 carros.

⁴ O horário ideal de coleta para este estudo é aquele no qual o volume de tráfego condiz ao volume adotado por Ayala(2013) em sua pesquisa. Conforme a Tabela 1, no item 4.3.1.

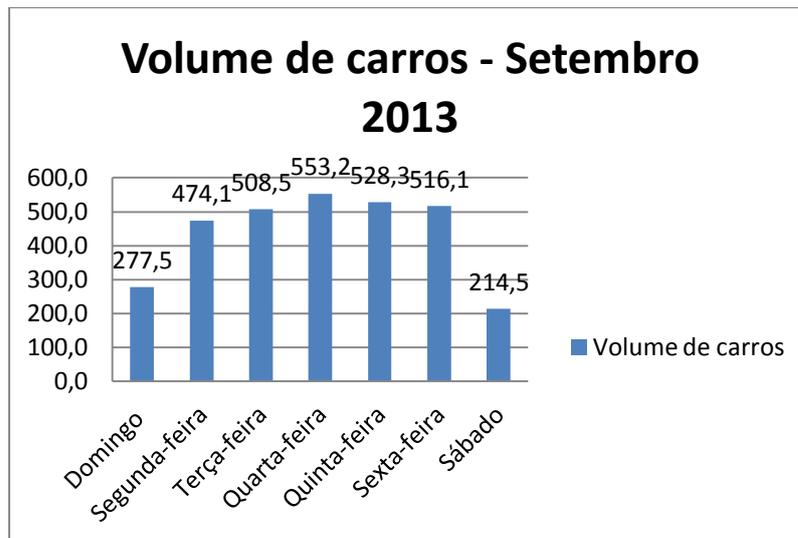
Gráfico 1 – Comparação Maio 2103 e Maio 2014



Fonte: DETRAN/DF

Os dados fornecidos pelo Detran/DF foram tratados, e plotados em gráficos para a melhor visualização do volume de carros x dias da semana e volume de carros x hora.

Gráfico 2 – Volume de carros x dias da semana



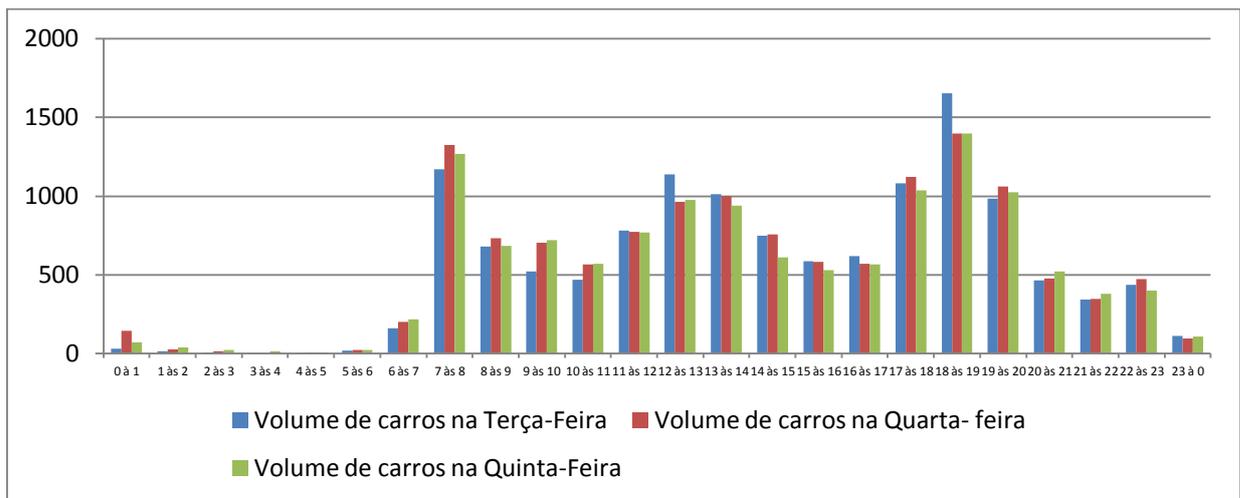
Fonte: DETRAN/DF

A partir da análise do gráfico 2, tem-se que o volume maior de carros está concentrado na terça, quarta e quinta-feira, por serem dias mais típicos, onde a população tem horário definido para entrar e sair do trabalho e/ou da escola, ou seja, a viagem é pendular. Já segunda e sexta são dias mais atípicos, pois os horários de saídas do trabalho diferenciam um pouco dos outros, e os finais de semana são dias que saem da rotina, por isso o volume é muito menor comparado aos dias de semana.

Tendo em vista que domingo, segunda-feira, sexta-feira e sábado o volume de carros não tem um padrão, para análise de volumes, levou-se em consideração apenas terça, quarta e quinta-feira.

No gráfico abaixo tem-se o volume de carro dos três dias da semana do mês de setembro de 2013. Os dados foram agrupados por hora e plotados no gráfico para a determinação da melhor hora da coleta de dados.

Gráfico 3 – Volume de carros x hora x dia da semana



Fonte: DETRAN/DF

Analizando o gráfico acima, conclui-se que os horários em que o volume de carros correspondente aproximadamente à 1090 carros, foi das 11:00 horas às 12:00 horas, e das 13:00 horas às 14:00 horas. Sendo assim, foi feita a contagem de carros e coletadas as medidas de desempenho do dia 30 de setembro, terça-feira, entre às 13:00 horas e 14:00 horas. A escolha de apenas um dia se deve ao fato da proximidade dos volumes de carros nos três dias da semana.

5.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO

As medidas de desempenho coletadas em campo foram às mesmas que Ayala (2013) assumiu, “Tempo Médio de Atraso” e “Comprimento Médio das Filas”. Essas medidas foram obtidas para cada faixa, por seção e por rede, porém, propõe-se, como Ayala (2013), considerar apenas os resultados médios da rede.

5.4.1 Tempo Médio de Atraso

A velocidade limite da via W4 é de 50 km/h e, por definição o tempo médio é a relação entre o tempo que um veículo leva de um ponto A à um ponto B qualquer, andando a essa velocidade, e o tempo real de deslocamento entre esses pontos. Recomenda-se que a distância entre o ponto A e B seja de 500 metros, porém, por dificuldades de coleta, a distância adotada foi de 77 metros, praticamente o tamanho de uma quadra. Um veículo andando a 50 km/h levaria 5,54 segundos para percorrer este trecho. Contudo, o tempo real de deslocamento observado foi em média de 6,75 segundos. Assim calcula-se o “Tempo Médio de Atraso”, para a via principal e secundária, a partir das fórmulas 3.1 e 3.2, expressas no item 3.4:

$$DTi_{PRINCIPAL} = \left(\frac{TDTi}{Di} \right) \times 1000 = 90,52 \text{ segundos} \quad (5.1)$$

$$DTi_{SECUNDÁRIA} = \left(\frac{TDTi}{Di} \right) \times 1000 = 90,93 \text{ segundos} \quad (5.2)$$

$$DT_{SYS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{sys}} DTi}{N_{sys}} = \frac{90,52 + 90,93}{2} = 90,72 \text{ segundos/Km} \quad (5.3)$$

5.4.1 Comprimento Médio das Filas

O comprimento médio das filas é o resultado da medida partindo do comprimento de fila que se forma a partir do primeiro carro a parar frente ao semáforo. Para este estudo, a cada parada foi feita a contagem da quantidade de carros, multiplicou-se pelo seu comprimento médio e se acrescentou a distância média de parada entre eles, tanto para a via principal como para a secundária.

Segundo TSS (2012), para a determinação do tempo médio de atraso, é necessária a aplicação das fórmulas 3.4 e 3.5, expostas no capítulo 3. Porém não será necessária a aplicação das fórmulas, pois o comprimento médio das filas foi medido diretamente em campo.

A unidade do comprimento médio das filas é “veículos”, ou seja, o número de veículos que formaram a fila. Assim fez-se uma contagem do número de veículos que ficavam parados na fila, em cada faixa, em cada seção. E posteriormente a média desses valores.

COMPRIMENTO MÉDIO DA FILA = 11,83 veículos

5.5 PARÂMETROS A SEREM CALIBRADOS

A partir da aplicação do procedimento realizado por Ayala (2013) foi obtido um grupo de parâmetros considerados influentes em todos os cenários simulados, levando em conta as medidas de desempenho de “tempo médio de atraso” e de “comprimento médio das filas” (conforme figura 11 no item 4.8). A pesquisa de Ayala (2013) apontou que o parâmetro 6 (variação do tempo de reação) se destaca pela sua importância no processo de calibração, uma vez que sua variação afetou o resultado das duas medidas de desempenho para todos os cenários estudados. O segundo conjunto teve importância para 75% a 99% dos cenários dos estudados, e englobam os parâmetros 8, 13 e 23, aceleração máxima, distância mínima entre veículos e tempo de reação respectivamente. O conjunto 3, com os parâmetros 11 e 12, distância mínima entre os veículos e tempo máximo de cessão de preferência, mostrou-se importante em 50% até 74% dos cenários.

Assim, a partir do estudo de Ayala, é possível concluir que os parâmetros de maior importância para a calibração estão no grupo 1 e 2. Tanto o primeiro, com apenas um parâmetro mas com influência em todos os cenários, como o segundo, com três parâmetros bastante representativos, mostram-se relevantes para a calibração. Seria de fato interessante a tentativa de calibrar os parâmetros do grupo 1 e 2, porém, não se tem uma base para iniciar essa calibração para uma intersecção em Brasília, além do que, trabalhar-se-ia com valores aleatórios, ou seja, um “jogo de loteria”. Frente a essa dificuldade, escolheu-se para estudo o grupo 1, que engloba apenas o parâmetro de variação do tempo de reação.

A variação do tempo de reação é o tempo que um condutor leva para reagir às mudanças de velocidade do veículo que o precede, usado no modelo de *car-following*. O tempo de reação pode ser fixo ou variável. O programa apresenta um valor *default* de 1,60s que são padrão para qualquer tipo de veículo.

5.6 SIMULAÇÃO E CALIBRAÇÃO

A simulação no Aimsun é organizada em cenários, experiências e reproduções. O ponto de partida da simulação é a configuração da rede, para isso é necessária uma série de dados de entrada, como o mapa da área, detalhes da rede; número de faixas, rampa de elevação, faixas de conversão e velocidade média da via.

O Aimsun pode definir mais de um cenário, e para cada um, pode ser criada uma experiência. Tais experiências são constituídas pelas reproduções, e as reproduções por réplicas, no caso de existirem mais do que uma, pode ser criada uma média das reproduções.

Os dados de demanda estão diretamente ligados ao fluxo de veículos, e são definidos no cenário. Como dados de demanda temos os tipos de veículos, o volume de tráfego e o tipo de controle de tráfego.

Nas experiências podem ser definidos, a duração do tempo de aquecimento, os valores das variáveis (no caso tempo de reação) e os modelos a serem ativados. As simulações podem ser interativas, ou seja, ocorre a visualização do tráfego, onde se pode variar a velocidade, e interromper a qualquer momento. Porém existe a possibilidade de simular sem animação, onde as respostas são fornecidas de forma rápida.

5.6.1 Simulação do cenário escolhido

- Configuração do cenário

Primeiramente foi importada a fotografia aérea da zona de estudo através do Google Earth. Com a imagem carregada na área de trabalho do simulador, foi possível criar a seção, indicar a direções das vias. Clicando na seção criada, abra-se um menu para formatar dados da via, como, largura da faixa, número de faixas, velocidade da via, se a faixa é ou não exclusiva, entre outras informações. Feito as vias, é necessário configurar o cruzamento, indicando as direções que podem ser tomadas, e as conversões a serem feitas. Ao termino da entrada de todos os dados geométricos da via, foi inserido os dados de demanda, tipo de veículos, e estados de tráfego (onde foi inserido o volume de carros de cada direção). O plano de controle foi o passo final para configuração do cenário, onde são inseridos os planos de controle dos semáforos.

- Experiências

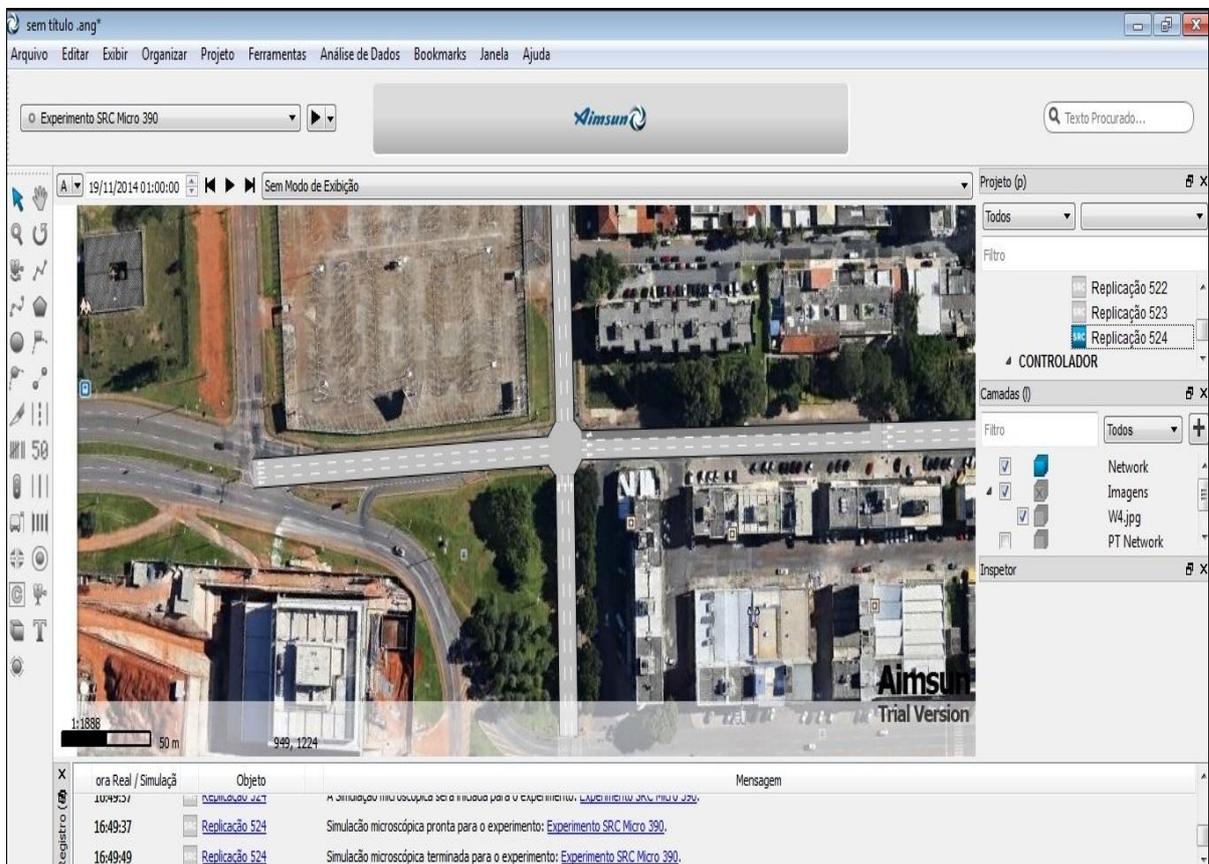
Criou-se assim a experiência para o cenário já descrito. Tal experiência foi constituída por reproduções. Na experiência pôde-se definir a duração do tempo de aquecimento, os valores das variáveis (no caso tempo de reação) e os modelos a serem ativados. As simulações foram feitas de maneira interativa, ou seja, ocorre a visualização do tráfego, onde se pode

variar a velocidade, e interromper a qualquer momento. Porém existe a possibilidade de simular sem animação, onde as respostas são fornecidas de forma rápida.

- Reprodução

Foram realizadas sete reproduções, com o mesmo cenário, cada uma com 30 réplicas, para obter uma média. O que diferenciava as reproduções era o valor do parâmetro “tempo de reação”. Ao termino de cada reprodução, o programa, como resposta, exibiu uma tabela com as medidas de desempenho, e seus respectivos valores. Esses resultados estão diretamente ligados ao cenário e dados de demanda inseridos. As simulações foram encerradas quando as medidas de desempenho escolhidas correspondiam às medidas em campo.

Figura 15 – Simulação no Aimsun (intersecção isolada W4, quadra 707, Asa Norte)



Fonte: Fotografia aérea - Google Earth

5.6.2 Calibração do parâmetro “Tempo de Reação”

A calibração do parâmetro “tempo de reação”, já definido anteriormente, se deu da seguinte maneira: Para a primeira reprodução, foi feita a simulação com o parâmetro no seu valor *default*, no caso 1,60 segundos. A partir daí as simulações foram feitas partindo da

diminuição de um valor dx do valor *default* do parâmetro e posteriormente, foi incrementado ao valor *default* um dx . Para todos os casos, os demais parâmetros foram mantidos com seus valores *default*.

dx assumiu o valor foi de 0,10. Assim a calibração foi feita com os valores:

$$\text{Default} = 1,60 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} - dx = 1,50 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} + dx = 1,70 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} - 2.dx = 1,40 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} + 2.dx = 1,80 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} - 3.dx = 1,30 \text{ segundos}$$

$$\text{Default} + 3.dx = 1,90 \text{ segundos}$$

Comparando as medidas de desempenho, “Comprimento Médio da Fila” e “Tempo Médio de Atraso”, dadas pelo simulador e medidas em campo, o parâmetro “Tempo de Reação” deve assumir o valor de 1,80 segundos. A tabela a seguir mostra os dados de saída do simulador Aimsun, quando a variável “Tempo de Reação”, assumi o valor definido.

Tabela 3 – Medidas de desempenho para Tempo de Reação = 1,80 segundos

Medidas de Desempenho	Valor-Aimsun	Desvio Padrão	Unidades	Valor-Campo
Fila Média - Car	11,94	N/D	veíc	11,83
Tempo de Atraso - Car	82,97	68,31	seg/km	90,72

Fonte: Dados obtidos da pesquisa

Para o cenário escolhido, o parâmetro “Tempo de Reação” deve assumir o valor de 1,80 segundos, para uma representação adequada da realidade. Observando que essa calibração é exclusiva para a situação estudada.

6 CONCLUSÃO

6.1 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

Os modelos de simulação microscópica são ferramentas importantes no que diz respeito ao planejamento e gestão de vias urbanas. Esses simuladores vêm sendo aperfeiçoados nas últimas décadas, tornando possível tirar conclusões, e testar técnicas, sem perturbar o sistema real. Porém é importante que os parâmetros de seus modelos sejam bem calibrados, para que esses programas representem devidamente a realidade, e torne seu uso de grande valia para solucionar problemas de tráfego.

A calibração dos parâmetros de um simulador é um trabalho complexo, devido ao número elevado dos mesmos. Frente a essa dificuldade, Ayala (2013), propôs uma simplificação no processo de calibração, identificando os parâmetros que são relevantes.

O presente trabalho foi desenvolvido, partindo da hipótese, de que, era possível calibrar um grupo de parâmetros, a partir de um cenário real. Utilizou-se com sucesso, o simulador Aimsun, aplicado à interseção isolada da W4 na altura da 707, localizado no Plano Piloto na cidade de Brasília. Este programa permitiu modelar o tráfego na interseção, que tem como tipo de controle - sinais luminosos.

Para que fosse possível a simulação, foi necessário levantar os dados geométricos, os tipos de controle, a composição do fluxo e o volume de tráfego. Foram adotadas algumas simplificações, como a presença de pedestres e outros tipos de veículos, assim a influência dos mesmos não pode ser avaliada.

Foi desenvolvida uma experiência para o cenário escolhido, contendo sete reproduções, o que as diferenciava era o valor do parâmetro “tempo de reação”. Comparando os dados de demanda do cenário real, e os do programa, encontrou-se um valor aproximado.

A simulação exige disponibilidade de tempo e volume de informação, que por vezes não é simples de ser obtido. No decorrer do trabalho foi encontrado dificuldades, como a escassez tempo para aprender a manusear a ferramenta, pois a falta de domínio pode impactar nos resultados. Referente á licença do Aimsun, por não ser um programa livre, as experiências ficaram limitadas aos computadores do PPGT-UnB, que possuem a licença, porém estavam com problemas técnicos no período das simulações. Para a pesquisa foi utilizado a versão free do Aimsun, em que não era possível salvar os testes realizados.

O objetivo da pesquisa era calibrar um pequeno grupo de parâmetro, e ele foi alcançado. Os resultados obtidos mostram que é possível calibrar um pequeno grupo de parâmetros que permitem a representação da realidade.

6.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para contribuir com a fundamentação deste trabalho o estudo poderia ser ampliado, calibrando os restantes dos grupos de parâmetros propostos por Ayala (2013), para este mesmo cenário.

Seria interessante realizar estudos semelhantes a outros tipos de cenários, de modo a permitir conclusões mais gerais, evitando os efeitos da singularidade que possam existir para a interseção modelada.

E por fim, adotando o cenário proposto, poderiam ser estudados os impactos dos pedestres, ciclistas e outros tipos de veículos que não foram considerados.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AIMSUN User's Manual – Version 1.0.6., TSS-Transporting Simulation Systems, 2005.

ANDRADE, E. L. Introdução à Pesquisa Operacional. Métodos e Modelagem para Análise da Decisão. Capítulo 8-Simulação. Livros Técnicos e Científicos Editora, 1994.

AYALA, R. J. L. (2013). Procedimento para Identificação dos Principais Parâmetros dos Microsimuladores a serem Considerados no Processo de Calibração. Dissertação de Mestrado em Transportes, Publicação: T. DM – 004 A/2013, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246p.

GIPPS, P. G. (1981). A Behavioural car-following Model for Computer Simulation. Transportation Research-B, Vol 15B (2). pp. 105-111

GOMES, G. Z. (2004). Uso de microsimuladores na avaliação da sustentabilidade de corredores rodoviários. Dissertação de Mestrado em Transportes. Escola de Engenharia Civil de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 103p.

HELLINGA, B. R. (1998). *Requirements for the calibrations of traffic simulation models*. Proceedings of the Annual Meeting of the CSCE, V. IV-B.

LA CALLE, M. J. (2003). *Calibración del microsimulador Aimsun para flujo ininterrompido en la Ciudad de Santiago*. Dissertação de mestrado. Escuela de Ingeniería, PUC, Chile.

LIGHTHILL, M.; WHITHAM, G. (1955). *On kinetic waves II: a theory of traffic flow on long, crowded rods*. Proceeding of the Royal Society of London. Series A, n.229.

MCLEAN, J. R. (1989). *Two-Lane Traffic Operation: Theory and Practice*. Gordon & Breach, New York, 408 p.

OLIVEIRA, M. J. F. Notas de aula do Curso de Simulação da Área de Pesquisa Operacional do Programa de Engenharia da Produção, COPPE/UFRJ, 1988.

PORTUGAL, L. S. Simulação de Tráfego: conceitos e técnicas de modelagem. Rio de Janeiro: Interciência, 2005. pp. 25-45

SALIBY, E. Repensando a Simulação: uma Amostragem Descritiva. Ed. Atlas. UFRJ, Coleção Coppead de Administração, Rio de Janeiro, 1989.

SHANNON, R. E. Introduction to simulation, *Proceeding of the 1992 Winter Simulation Conference*, 1992. pp. 65-73.

VILARINHO, C. A. T. (2008). Calibração de Modelos Microscópicos de Simulação de Tráfego em Redes Urbanas. Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto, Porto, Portugal, 92p.