

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE TRÁFEGO DOS
MODELOS SATURN E DRACULA**

Davi Ribeiro Campos de Araújo

Porto Alegre

2003

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DE TRÁFEGO DOS
MODELOS SATURN E DRACULA**

Aluno: Davi Ribeiro Campos de Araújo

Orientadora: Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Banca Examinadora:

Professora Maria Alice Prudêncio Jacques, Ph.D.

Prof^a. ENC / UNB - Brasília

Professora Lenise Grando Goldner, Dr^a.

Prof^a. PPGEC / UFSC - Florianópolis

Professor Luis Antonio Lindau, Ph.D.

Prof. PPGEP / UFRGS

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
como requisito parcial à obtenção do título de**

MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Área de concentração: Sistemas de Transportes

Porto Alegre, junho de 2003

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Prof^a. Helena Beatriz Bettella Cybis
Orientadora

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Coordenador PPGE/UFGRS

Banca Examinadora:

Professora Maria Alice Prudêncio Jacques, Ph.D.
Prof^a. ENC / UNB - Brasília

Professora Lenise Grando Goldner, Dr^a
Prof^a. PPGE/UFSC - Florianópolis

Professor Luis Antonio Lindau, Ph.D.
Prof. PPGE/UFGRS

AGRADECIMENTOS

Agradeço, com consideração:

de modo muito especial à minha orientadora Helena Beatriz Bettella Cybis, pela valiosa orientação, motivação e apoio, pelas oportunidades e ensinamentos, e pela persistência, os quais me foram vitais para o desenvolvimento desse trabalho;

aos professores Lindau e Senna, que também fundamentaram a minha formação em Transportes, e aos demais professores e funcionários do LASTRAN e PPGEP;

à UFRGS e instituições de fomento à pesquisa, que me subsidiaram a infraestrutura científica, tecnológica, e os recursos para minha formação;

aos colegas e amigos do LASTRAN que me ajudaram com boa vontade na coleta de dados;

aos colegas Cristiano Giustina, Érico Gunzen e Rita Zignanni, pelo habilidoso auxílio no tratamento dos dados;

às amigas Caroline Pecker, Magda Magro, e Alice Clok, que compartilharam a jornada, multiplicando as alegrias e fracionando as dificuldades;

em especial às colegas Paula Ariotti e Luciana Ferronato, pelo valioso apoio que fez a diferença;

aos que me são queridos e me motivaram;

à Ivone Renck e Locimara Ramos, que me ensinaram a superar limitações;

à meus pais e familiares pelo apoio indispensável; à minha mãe, em especial, cuja motivação e amor persistentes ultrapassaram o tempo e a matéria;

... à Deus, sobretudo.

Davi Ribeiro Campos de Araújo

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
LISTA DE QUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	X
RESUMO	XI
ABSTRACT	XII
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1 Contextualização e apresentação do tema	1
1.2 Caracterização do estudo	4
1.2.1 Objetivos.....	4
1.2.1.1 Objetivo geral	4
1.2.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.2.2 Estrutura do trabalho	4
CAPÍTULO 2 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO	6
2.1 Introdução	6
2.2 Simulação de tráfego	8
2.3 Classificações dos modelos de tráfego	9
2.3.1 Lógica estrutural	9
2.3.2 Nível de agregação	10
2.3.3 Escala temporal	10
2.3.4 Mudança de estado	10
2.3.5 Flexibilidade do tráfego.....	11
2.3.6 Variabilidade aleatória.....	11
2.4 Nível de agregação dos modelos	12
2.4.1 Modelagem macroscópica	12
2.4.2 Modelagem microscópica.....	13
2.4.3 Modelagem mesoscópica.....	14
2.5 Aplicação de modelos	14
2.5.1 Concepção dos cenários avaliados	15
2.5.2 Levantamento e codificação de dados	16
2.5.3 Calibração e validação de modelos	17
2.5.4 Modelagem dos cenários e análise de resultados	19
2.5.5 Análises de sensibilidade.....	19
2.6 Comparação de modelos	20
2.7 Estudos práticos com o SATURN e o DRACULA	22
2.8 Conclusões do capítulo	22
CAPÍTULO 3 - O SATURN E O DRACULA	24
3.1 Apresentação do capítulo	24
3.2 O SATURN	24
3.2.1 Estrutura de execução do SATURN.....	25
3.2.2 Simulação no SATURN	26
3.2.2.1 Dados de entrada	26
3.2.2.2 Elementos específicos de modelagem	28
3.2.2.3 Parâmetros de saída	30
3.3 O DRACULA	31
3.3.1 Visão geral do DRACULA	31

3.3.2	Simulação no DRACULA	32
3.3.2.1	Estrutura da simulação	33
3.3.2.2	Dados de entrada	34
3.3.2.3	Elementos específicos de modelagem	35
3.3.2.4	Parâmetros de saída	37
3.4	O uso conjunto do SATURN e do DRACULA	38
3.5	Comparação das simulações do SATURN e do DRACULA	39
3.5.1	Dados de entrada	39
3.5.1.1	Descrição de rede.....	39
3.5.1.2	Demanda de tráfego.....	40
3.5.2	Aceitação de brechas	41
3.5.3	Parâmetros de saída	41
3.5.3.1	Tempos de viagem e atrasos.....	41
3.5.3.2	Modelagem de capacidades viárias	42
3.6	Conclusões do capítulo	45
CAPÍTULO 4 - TESTES COMPARATIVOS DE ANÁLISES DE SENSIBILIDADE		46
4.1	Apresentação do capítulo.....	46
4.2	Teste 1 – capacidade no DRACULA x velocidade desejada.....	47
4.2.1	Descrição dos cenários	48
4.2.2	Resultados.....	49
4.2.3	Análise dos resultados	49
4.3	Teste 2 – velocidades geral e de cruzeiro, tempos de viagem e atrasos x demanda e comprimento do arco.....	50
4.3.1	Situação A: arco sem controle de tráfego	51
4.3.1.1	Descrição dos cenários	51
4.3.1.2	Resultados.....	52
4.3.1.3	Análise dos resultados	54
4.3.2	Situação B: arco com controle de tráfego.....	55
4.3.2.1	Descrição dos cenários	55
4.3.2.2	Resultados.....	56
4.3.2.3	Análise dos resultados	64
4.4	Conclusões do capítulo	65
CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO: MODELAGEM DA AV. INDEPENDÊNCIA..		68
5.1	Apresentação do capítulo.....	68
5.2	Metodologia de modelagem adotada.....	69
5.3	Concepção dos modelos.....	70
5.3.1.1	Área de estudo	71
5.3.1.2	Pontos de geração de tráfego	72
5.4	Levantamento e apropriação de dados.....	73
5.4.1	Levantamento prévio de dados	73
5.4.2	Coleta de dados em campo	73
5.4.2.1	Velocidade de cruzeiro e velocidade geral	74
5.4.2.2	Demanda de tráfego.....	75
5.4.2.3	Medição de filas.....	78
5.5	Codificação dos modelos	81
5.6	Calibração e validação do SATURN.....	84
5.6.1	Medidas de calibração e ajuste do SATURN	84
5.6.1.1	Demanda de tráfego.....	84
5.6.1.2	Ajuste do GAP.....	87
5.6.2	Validação do modelo SATURN.....	87

5.7	Calibração do DRACULA	89
5.7.1	Calibração do DRACULA: aplicação do processo	92
5.7.1.1	Ajuste da descrição de rede	92
5.7.1.2	Avaliação do modelo default	92
5.7.1.3	Ajustes preliminares de calibração	93
5.7.1.4	Análise de sensibilidade	94
5.7.2	O modelo calibrado	101
5.7.3	Verificação do ajuste	101
5.7.4	Análise de consistência da velocidade desejada.....	103
5.7.5	Comparação de resultados: SATURN X DRACULA.....	105
5.8	Conclusões do capítulo	106
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES		107
6.1	Apresentação do capítulo.....	107
6.2	Análise comparativa - fundamentação teórica e testes de análise de sensibilidade	108
6.3	Estudo de caso – Modelagem da av. Independência	109
6.3.1	Metodologia empregada	109
6.3.2	Análise de resultados	110
6.4	Sugestões para trabalhos futuros	112
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		113
ANEXO 1: DETALHAMENTO DA AV. INDEPENDÊNCIA.....		118
ANEXO 2: NÓS DA REDE DA AV. INDEPENDÊNCIA		122
ANEXO 3: FILMAGEM DA FILA JUNTO À RUA SANTO ANTÔNIO		123

LISTA DE QUADROS

Quadro 4.1 - Variação da capacidade em função da velocidade desejada	49
Quadro 4.2 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo DRACULA no Teste 2A	53
Quadro 4.3 – Razões entre velocidades gerais no Teste 2A.....	54
Quadro 4.4 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo SATURN no Teste 2B.....	56
Quadro 4.5 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo DRACULA no Teste 2B	56
Quadro 4.6 – Razões entre velocidades gerais no Teste 2B.....	57
Quadro 4.7 - Atrasos [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B	58
Quadro 4.8 - Atrasos [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B.....	58
Quadro 4.9 - Razões entre os atrasos no Teste 2B	60
Quadro 4.10 – Tempos de cruzeiro [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B.....	61
Quadro 4.11 - Tempos de cruzeiro [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B	61
Quadro 4.12 - Razões entre os tempos de cruzeiro no Teste 2B.....	62
Quadro 4.13 – Tempos totais de viagem [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B.....	64
Quadro 4.14 - Tempos totais de viagem [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B.....	64
Quadro 4.15 - Razões entre os tempos totais de viagem no Teste 2B.....	64
Quadro 5.1 - Velocidades observadas na av. Independência	75
Quadro 5.2 - Dimensões dos veículos observadas	76
Quadro 5.3 – Dimensões médias dos grupos de veículos.....	77
Quadro 5.4 – Medição da fila junto à rua Santo Antônio (Fila SA).....	81
Quadro 5.5 – Medição da fila junto à rua Ramiro Barcelos, pista sul (Fila RS).....	81
Quadro 5.6 – Medição da fila junto à rua Ramiro Barcelos, pista norte (Fila RN).....	81
Quadro 5.7 - Fluxos de saturação adotados no SATURN.....	82
Quadro 5.8 - Fluxos observados x fluxos modelados pelo SATURN.....	86
Quadro 5.9 - Comparação das filas médias [UVP]	87
Quadro 5.10 - Comparação dos atrasos em fila[s].....	88
Quadro 5.11 - Resultados com parâmetros <i>defaults</i> do DRACULA.....	93
Quadro 5.12 - Valores das variáveis independentes.....	96
Quadro 5.13 - Correlações preliminares entre as variáveis	97
Quadro 5.14– Valores das variáveis nas regressões definitivas	98
Quadro 5.15 - Correlações entre as variáveis	98
Quadro 5.16 - Resultados da regressão: modelo da velocidade	99
Quadro 5.17 - Resultados da regressão: modelo da Fila RN.....	99
Quadro 5.18 - Resultados da regressão: modelo da fila RS	100
Quadro 5.19 – Referenciais de campo.....	100

Quadro 5.20 – Estimativas dos modelos calibrados	101
Quadro 5.21 – Resultados médios para o modelo DRACULA calibrado	102
Quadro 5.22 – Resultados DRACULA: dez simulações	102
Quadro 5.23 - Velocidades gerais nos trechos	103
Quadro 5.24 - Resultados agregados da rede	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Estrutura básica de operação do SATURN.....	26
Figura 3.2 – Variação dos atrasos com a demanda (SATURN e DRACULA).....	44
Figura 4.1 – Estrutura da rede modelada.....	48
Figura 4.2 - Capacidade viária modelada [veic/h] em função da velocidade desejada.....	49
Figura 4.3 - Estrutura padrão das redes modeladas.....	51
Figura 4.4 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do DRACULA no Teste 2A.....	53
Figura 4.5 - Razões entre velocidades gerais no Teste 2A (V_{SAT}/V_{DRAC}).....	54
Figura 4.6 - Estrutura padrão das redes modeladas.....	55
Figura 4.7 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do SATURN no Teste 2B.....	56
Figura 4.8 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do DRACULA no Teste 2B.....	57
Figura 4.9 - Razões entre velocidades gerais (V_{SAT}/V_{DRAC}) no Teste 2B.....	58
Figura 4.10 – Atrasos [s] estimados através do SATURN no Teste 2B.....	59
Figura 4.11 – Atrasos [s] estimados através do DRACULA no Teste 2B.....	59
Figura 4.12 - Razões entre atrasos (A_{SAT}/A_{DRAC}) no Teste 2B.....	60
Figura 4.13 - Tempos de cruzeiro [s] estimados através do SATURN no teste 2B.....	61
Figura 4.14 – Tempos de cruzeiro [s] estimados através do DRACULA no Teste 2B.....	62
Figura 4.15 - Razões entre tempos de cruzeiro (TC_{sat}/TC_{drac}) no Teste 2B.....	63
Figura 5.1 - Rede modelada.....	71
Figura 5.2 – Variabilidade da demanda total na hora modelada (em veic a cada 15 min).....	76
Figura 5.3 – Filmagem da interseção junto à rua Ramiro Barcelos (Fila RS e Fila RN).....	79
Figura 5.4 - Diagrama de fila junto à rua Ramiro Barcelos.....	80
Figura 5.5 - Diagrama de fila extensa (com chegada e saída de veículos simultâneas).....	80
Figura 5.6 - Representação da rede modelada através do SATURN.....	83
Figura 5.7 - Representação da rede modelada através do DRACULA.....	84
Figura 5.8 – Fluxos observados x fluxos modelados pelo SATURN.....	86
Figura 5.9 – Filas médias: estimativa do SATURN e medição de campo.....	88
Figura 5.10 – Atrasos em fila: estimativa do SATURN e medição de campo.....	88
Figura 5.11 – Comparação das velocidades gerais nos trechos.....	104
Figura 5.12 – Reta de ajuste das velocidades gerais nos trechos.....	105

RESUMO

Os modelos computacionais SATURN e DRACULA avaliam o tráfego através de diferentes fundamentações teóricas. O SATURN é um modelo macroscópico de alocação de tráfego que incorpora uma estrutura mesoscópica de simulação de interseções. O DRACULA é um modelo microscópico de simulação de tráfego: reproduz a progressão dos veículos através da rede, representando cada entidade individualmente. Ambos os modelos foram desenvolvidos no ITS – *Institute for Transport Studies* – da Universidade de Leeds, e permitem a troca de informações, podendo ser aplicados em conjunto.

O presente trabalho de pesquisa compara as estruturas de simulação do SATURN e do DRACULA. O estudo confronta as fundamentações teóricas dos modelos, relacionando-as com a aplicação prática. São avaliados os dados de entrada, os parâmetros de saída, e os processos particulares de estimação de parâmetros de cada modelo. Através de análises de sensibilidade, avalia-se o impacto da variação de dados de entrada nos parâmetros de saída. Em um estudo de caso, avalia-se a aplicação conjunta dos modelos, ao replicarem o mesmo cenário.

O estudo identifica divergências e afinidades na conceituação e no tratamento de parâmetros de entrada e saída tais como dados de descrição de rede e demanda, atrasos, velocidades, tempos de viagem, e capacidade viária. Por fim, o estudo propõe recomendações sobre a implementação prática dos modelos, especialmente quando utilizados em conjunto.

ABSTRACT

SATURN and DRACULA computer models evaluate traffic through different theoretical approaches. SATURN is a macroscopic traffic assignment model that includes a mesoscopic junction simulation model. DRACULA is a microscopic traffic simulation model: it reproduces vehicle progression through the network, representing each vehicle individually. Both models were developed at the ITS – Institute for Transport Studies – at Leeds University and they allow information to be exchanged, so that they can be jointly applied.

The present research compares SATURN's and DRACULA's simulation structures. The study compares the models' theoretical approaches, relating them to their practical application. The input data, the output parameters and each model's particular processes of parameter calculation are evaluated. Through sensitivity analysis, the data variability impact on output parameters is evaluated. In a case study the joint model application is evaluated, as the models replicate the same network.

This study identifies differences and similarities in conceptualising and dealing with output and input parameters, such as network-description data and demand, delays, speeds, travel time and road capacity. Finally the study proposes recommendations about the practical implementation of the models, mainly when they are jointly used.

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO TEMA

Na sociedade moderna, o tráfego rodoviário assume significativa importância social e econômica. O sistema é composto por uma rede de ligação entre indivíduos e seus pontos de interesse, que dá suporte ao escoamento da produção e ao desenvolvimento de serviços e atividades sociais. Nos Estados Unidos, os gastos em transportes equivalem a 20 % do PNB (Produto Nacional Bruto), dos quais 85% devem-se ao tráfego rodoviário urbano e interurbano (Gartner *et al.*, 1997).

Um dos principais problemas da relação entre oferta e demanda de transporte é o congestionamento, que ocorre quando a demanda atinge a capacidade viária. Em condições de saturação, os tempos de viagem aumentam e o fluxo de tráfego é reduzido, significativamente.

A ineficiência do sistema de tráfego viário, bastante comum nas grandes concentrações urbanas, custa caro à sociedade. No Reino Unido, estima-se que o congestionamento custe o equivalente a 41 milhões de libras por dia (Lind *et al.*, 1999). Em São Paulo, estima-se que os custos sociais decorrentes do congestionamento correspondam a 346 milhões de reais ao ano (IPEA e ANTP, 1999).

O Planejamento de Transportes e a implantação de medidas de Engenharia de Tráfego exigem a compreensão do sistema de tráfego rodoviário como um todo. Modelos

computacionais de tráfego replicam a realidade, estimando o comportamento do tráfego em cenários hipotéticos. Assim, o uso de modelos computacionais permite uma melhor compreensão do sistema, viabilizando a avaliação e o aperfeiçoamento de alterações propostas para a rede viária.

Modelagem de tráfego

Modelos consistem em uma representação ou idealização das características de um processo ou sistema do mundo real (Owen *et al.*, 1996). Os modelos computacionais de tráfego compõem um amplo conjunto de ferramentas com largo potencial de aplicabilidade.

Modelos de alocação de tráfego reproduzem o processo de escolha de rotas dos usuários em redes viárias abrangentes. Os modelos de simulação de tráfego, por sua vez, reproduzem de maneira lógica a evolução do tráfego no ambiente viário, estimando elementos tais como atrasos, tempos de viagem e velocidades.

Atualmente, a aplicabilidade dos modelos de tráfego, para estudos em nível estratégico e tático, é bastante vasta. Modelos computacionais são utilizados para a avaliação de alternativas em gerenciamento de tráfego; para planejamento, projeto e teste de novas instalações de transportes; como suporte a outras ferramentas e sistemas (sistemas de controle de tráfego e otimização, sistemas inteligentes, etc.); e para treinamento de técnicos na área de tráfego; entre outras aplicações.

Os diferentes campos de aplicação dos modelos exigem ferramentas com objetivos distintos. Modelos com objetivos distintos, naturalmente, apresentam hipóteses e propriedades diferenciadas. O nível de agregação com que o tráfego é representado constitui uma importante propriedade dos modelos. Modelos macroscópicos reproduzem o tráfego de maneira agregada, enquanto que os modelos microscópicos avaliam explicitamente as interações veículo a veículo. A modelagem mesoscópica constitui um nível intermediário de detalhamento.

A modelagem tradicional de alocação de tráfego faz uso da abordagem macroscópica. As hipóteses simplificadas conduzem a previsões de fluxos satisfatórias para fins de gerenciamento de tráfego e planejamento de transportes. Já os modelos de simulação de tráfego, que propõem justamente uma descrição mais detalhada da evolução do tráfego através do ambiente viário, tradicionalmente replicam o sistema em nível microscópico.

Modelos de simulação de tráfego são representações matemáticas e lógicas de sistemas do mundo real, que tomam a forma de um software computacional. Tais modelos

integram o comportamento das entidades individuais do sistema de modo a produzir uma descrição quantitativa detalhada do desempenho global. Tradicionalmente, os modelos de simulação descrevem sistemas dinâmicos, onde o tempo é sempre uma variável independente (Lieberman e Rathi, 1997).

A associação de modelos macroscópicos de escolha de rotas com modelos de micro-simulação de tráfego é complementar e atrativa. O uso associado amplia o potencial de investigação das análises, preservando as vantagens individuais de cada abordagem.

O SATURN e o DRACULA

O SATURN (Hall *et al.*, 1980) é um modelo de alocação de tráfego que incorpora uma estrutura mesoscópica de simulação. O DRACULA (Liu *et al.*, 1995) é um simulador microscópico de redes de tráfego urbanas. Os dois modelos foram desenvolvidos na mesma instituição e oferecem uma vantagem: o DRACULA pode ser utilizado associado com o SATURN.

O uso associado viabiliza a exportação automática de informações do SATURN para o DRACULA. O arquivo de dados de descrição da rede viária assume a mesma formatação para ambos os modelos, e os fluxos na rede estimados pela escolha de rotas do SATURN podem ser exportados, em formatação compatível, diretamente para o DRACULA. A bibliografia reporta diversos estudos de caso e trabalhos de pesquisa envolvendo o uso associado dos modelos (Aden, 1995; Liu *et al.* 2001; e Muizelaar, 2002), inclusive no Brasil (Araújo e Cybis, 2002).

A estrutura de simulação particular de cada modelo é desenvolvida a partir de hipóteses fundamentais sobre o tráfego. Assim, através dos dados de entrada e de características específicas de modelagem, os modelos estimam parâmetros de saída tais como atrasos, velocidades e tempos de viagem.

As estruturas de simulação mesoscópica do SATURN e microscópica do DRACULA são, naturalmente, diferentes. No entanto, os modelos podem utilizar uma base de dados comum, e permitem a troca de informações, de modo que é importante compreender essas diferenças para que os modelos possam ser corretamente utilizados. Assim, investigações específicas confrontando as estruturas de simulação do SATURN e do DRACULA se tornam bastante úteis.

O presente trabalho de pesquisa tem por objetivo caracterizar e comparar as estruturas de simulação do SATURN e do DRACULA.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO

1.2.1 Objetivos

1.2.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo comparar as estruturas de simulação dos modelos SATURN e DRACULA. A finalidade da comparação é apontar recomendações para o uso conjunto dos modelos, em redes urbanas.

As análises são focalizadas nos dados de entrada, nas características específicas de modelagem, e nos parâmetros de saída típicos de modelos de simulação tais como tempos de viagem, atrasos, e velocidades.

1.2.1.2 Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral, o estudo compreende os seguintes objetivos específicos:

- (i)* Fundamentar e confrontar teoricamente as estruturas de simulação do SATURN e do DRACULA envolvendo os dados de entrada, características específicas da simulação, e os parâmetros de saída.
- (ii)* Comparar a estimação de atrasos, tempos e velocidades através de modelos implementados com conjuntos de dados idênticos.
- (iii)* Propor, com base nas fundamentações teóricas, medidas práticas para a aplicação conjunta dos modelos.
- (iv)* Avaliar e comparar o processo de modelagem de um trecho viário real, em um estudo de caso utilizando-se o SATURN e o DRACULA.
- (v)* Indicar, a partir da experiência obtida, recomendações sobre o uso dos modelos, especialmente quando aplicados em conjunto.

1.2.2 Estrutura do trabalho

O trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro deles corresponde à presente introdução que contextualiza e delimita o tema da pesquisa, define o problema, propõe os objetivos do estudo, e apresenta a estrutura do trabalho.

O segundo capítulo abrange a revisão bibliográfica sobre modelagem e simulação de tráfego pertinente ao tema: classificações diversas dos modelos de tráfego, concentrando-se

no nível de agregação; aplicações do SATURN e do DRACULA; estudos sobre comparação de modelos; e etapas metodológicas de aplicação de modelos.

O terceiro capítulo apresenta e compara a fundamentação teórica do SATURN e do DRACULA, concentrando-se nas estruturas de simulação. São abordadas a descrição dos dados, as características específicas de modelagem, e o processo de estimação de atrasos, tempos de viagem e velocidades.

O quarto capítulo apresenta uma série de modelos implementados com o SATURN e o DRACULA, em testes de análises de sensibilidade. As análises permitem uma melhor compreensão da estimação de atrasos, tempos de viagem e velocidades.

O quinto capítulo apresenta o desenvolvimento um estudo de caso onde dados parciais de um modelo DRACULA são obtidos a partir de um modelo SATURN. No capítulo apresenta-se o desenvolvimento das etapas de modelagem, compara-se os resultados obtidos e, a partir da experiência obtida, são formuladas instruções sobre o uso dos modelos.

O sexto e último capítulo traz as conclusões finais do estudo e propõe trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

2.1 INTRODUÇÃO

A fundamentação teórica acerca de modelagem e simulação de tráfego foi desenvolvida a partir de bibliografia tradicional que reporta aspectos teóricos e práticos sobre o tema (Lieberman e Rathi, 1997; Owen *et al.*, 1996; May, 1990; Lind *et al.*, 1999; Algiers *et al.*, 1997; e Gartner *et al.*, 2003).

O sistema de tráfego é composto pelas seguintes entidades interagindo: sistema viário, dispositivos de controle, veículos, e seus usuários.

Um modelo consiste em uma aproximação, representação ou idealização de aspectos selecionados da estrutura, comportamento, ou outras características de um processo ou sistema do mundo real. Modelos podem ter outros modelos como componentes (Owen *et al.*, 1996).

Os modelos de tráfego compõem um amplo conjunto de ferramentas, com largo potencial de aplicabilidade. Os primeiros estudos científicos sobre teoria do fluxo de tráfego remetem à década de 30. Greenshields (1935)¹ *appud* Gartner *et al.* (2003) estudou modelos matemáticos relacionando velocidade e volume. Adams (1936)² *appud* Gartner *et al.* (2003) aplicou teoria de probabilidades para descrever o tráfego viário.

¹ GREENSHIELDS, B. D. A study in highway capacity. In: HIGHWAY RESEARCH BOARD, **Proceedings...** [s. l.], v. 14, p. 458, 1935.

² ADAMS, W. F. **Road traffic considered as a Random Series**. London, J. Inst. Civil. Engineering, 1936.

Após a segunda guerra mundial, as grandes expansões do sistema viário e da indústria automotiva impulsionaram o desenvolvimento de novas pesquisas sobre o tráfego, incluindo teoria de filas e *car-following*. Lighthill e Whitham (1955)³ *appud* (Hoogendoorn e Bovy, 2001) apresentaram um modelo fazendo analogia entre veículos no fluxo de tráfego e partículas em um fluido.

Outra pesquisa pioneira no tema remete à década de sessenta, e refere-se a uma série de experimentos conduzidos nos laboratórios da *General Motors*. Essas formulações assumem que a variação da velocidade de um determinado veículo é função da aceleração e da distância do veículo que trafega à sua frente. Essa pesquisa propõe uma abordagem que merece destaque, pois descreve o sistema considerando as interações entre os veículos individualmente (Silva e Tyler, 2002).

Desde então, a descrição matemática do fluxo de tráfego tem sido objeto de pesquisa e prática no meio técnico e acadêmico.

Na década de setenta, com apoio incipiente dos computadores *mainframe*, a pesquisa e o desenvolvimento dos modelos computacionais de tráfego começam a crescer. Na década de oitenta, com o advento dos computadores pessoais, as atividades de pesquisa se difundem rapidamente e as aplicações práticas de modelos computacionais de tráfego se tornam cada vez mais frequentes. Por fim, na década de noventa, os modelos incorporam técnicas computacionais avançadas e a modelagem de tráfego já é prática corrente nos cinco continentes.

Atualmente, a disponibilidade de modelos é vasta. Boxill e Yu (2000) apresentam uma revisão bibliográfica abordando 84 modelos de tráfego disponíveis.

Tradicionalmente, a comunidade da engenharia de tráfego distingue três tipos de modelos computacionais de tráfego: modelos de otimização semaforica, modelos de alocação de tráfego, modelos de simulação de tráfego. As formulações tradicionais de modelos de otimização semaforica e modelos de alocação de tráfego são simplesmente analíticas. Modelos de otimização semaforica objetivam minimizar alguma medida de desutilidade como atrasos ou paradas. Modelos de alocação de tráfego reproduzem o processo de escolha de rotas dos indivíduos através de uma rede viária. Nas abordagens tradicionais baseadas no equilíbrio, o algoritmo de escolha de rotas define os fluxos nas vias baseado na minimização de tempos, distâncias ou custos de viagem (OWEN *et al.*, 1996).

³ LIGHTHILL, M. H., WITHAM, G. B. On kinematic waves II: a theory of traffic flow on long crowded roads. In: ROYAL SOCIETY OF LONDON SERIES A, *Proceedings...* [s. l.], p. 317-345

À medida que cresce o número de entidades envolvidas e o detalhamento da avaliação do sistema, a descrição através de métodos analíticos se torna mais complexa. Daí, justamente, as técnicas de simulação se fazem mais apropriadas.

2.2 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

A simulação de tráfego é uma ferramenta eficiente para analisar uma larga variedade de problemas dinâmicos, difíceis de se analisar por outros meios. Esses problemas são caracterizados por processos complexos onde interagem, ao longo do tempo, várias entidades e componentes de um sistema. Essas interações simultâneas dos vários componentes do sistema não podem, em geral, ser adequadamente descritas em forma matemática ou lógica. Entretanto, o comportamento de cada entidade ou a interação de um número limitado de elementos pode ser bem compreendido, de modo a ser representado logicamente e matematicamente com confiança aceitável (Lieberman e Rathi, 1997).

Características da simulação

Os uso de modelos de simulação é indicado quando abordagens analíticas podem não ser satisfatoriamente apropriadas para avaliar o problema. Segundo May (1990), os modelos de simulação apresentam as seguintes vantagens potenciais:

- São apropriados para avaliar situações novas, inexistentes.
- Permitem avaliar a importância relativa das variáveis no processo, e como elas se relacionam.
- Permitem avaliar políticas no modo “*off-line*”, em alternativa à prática de tentativa e erro “*on-line*”.
- Provém informações com seqüência temporal e espacial, não apenas valores médios e variâncias.
- Permitem estudar o sistema em tempo real, acelerado ou desacelerado.
- Permitem avaliar experimentos sobre sistemas inseguros sem oferecer risco aos usuários.
- Permitem quantificar os padrões referenciais para comparação de cenários alternativos.
- Permitem avaliar os efeitos decorrentes de mudanças na operação de um sistema.

Por outro lado, o autor alerta sobre eventuais restrições e limitações da modelagem através de simulação:

- Pode haver alternativas mais fáceis para resolver o problema. É importante que o analista considere outros recursos de análise alternativos.
- Simulação consome tempos extensos e custa caro.
- Modelos de simulação exigem volumes de dados significativos. Muitos desses constituem-se em informações de difícil obtenção ou apropriação.
- Os modelos de simulação possuem calibração e validação complexas. Se as etapas forem deficientes, o modelo é inútil.
- A aplicação de modelos de simulação requer domínio sobre uma ampla variedade de conhecimentos que inclui: teoria de fluxo, programação e operação computacional, probabilidade, estatística, e tomada de decisão.
- Simulação só é viável quando o sistema avaliado é profundamente compreendido.
- Um modelo de simulação pode ser difícil de ser utilizado por usuários que não sejam seus autores. O uso de simulação exige documentação detalhista e clara, além de condições computacionais adequadas.
- O uso de modelos de simulação exige compreensão, além dos dados e parâmetros de saída, dos processos de estimação intermediários. Também é importante conhecer as limitações e hipóteses dos modelos.

2.3 CLASSIFICAÇÕES DOS MODELOS DE TRÁFEGO

Os modelos de tráfego podem ser classificados segundo diversos aspectos. A seguir, são apresentados alguns critérios de classificação largamente reportados na bibliografia.

2.3.1 Lógica estrutural

A forma de operacionalização é caracterizada pela fundamentação teórica, matemática, e a lógica estrutural do modelo (Middleton e Cooner, 1999).

Modelos de simulação predizem desempenho de sistema através de representações das interações temporais e espaciais entre os componentes do sistema. Frequentemente, caracterizam a natureza estocástica do fluxo de tráfego.

Os modelos empíricos estimam o desempenho de sistemas baseados em relações matemáticas formuladas através de análises estatísticas, como análises de regressões aplicadas a dados observados em campo.

Modelos analíticos calculam o desempenho do sistema usando relações entre seus componentes desenvolvidas através de considerações teóricas (como teoria de filas determinísticas ou probabilísticas) calibradas e validadas com dados de campo.

2.3.2 Nível de agregação

O nível de agregação com que o tráfego é tratado constitui um importante critério de classificação dos modelos. Modelos macroscópicos tratam o tráfego com baixo nível de detalhamento. O tráfego é representado como uma entidade única, e o sistema é descrito através de relações entre fluxo, densidade e velocidade.

Modelos microscópicos, por sua vez, descrevem tanto as entidades do sistema como suas interações através de um alto nível de detalhamento. Cada entidade é individualmente representada, e suas interações com as demais são explicitamente avaliadas.

Os modelos mesoscópicos apresentam características mistas, constituindo um nível intermediário de agregação. Representam ou as entidades, ou suas interações de forma agregada, porém preservam, em algum desses aspectos, um nível expressivo de detalhamento.

A seção 2.4 amplia a discussão sobre o nível de agregação dos modelos de tráfego.

2.3.3 Escala temporal

A classificação em relação à escala temporal descreve como os fenômenos modelados são vinculados ao tempo.

Modelos estáticos não representam os diversos estados do sistema assumidos ao longo do tempo. Representam uma condição fixa, que corresponde a um instante específico ou ao comportamento médio ao longo do período de análise.

Os modelos dinâmicos consideram o tempo uma importante variável independente no fenômeno modelado. Assim, as mudanças que o sistema sofre, ao longo do tempo, são explicitamente avaliadas.

2.3.4 Mudança de estado

A classificação em relação à mudança de estado se aplica somente aos modelos dinâmicos. Essa classificação caracteriza como as mudanças da descrição do sistema são vinculadas à variável independente *tempo*.

Modelos discretos descrevem as mudanças no sistema apenas em instantes isolados do tempo. Assim, assumem que mudanças no estado do sistema ocorrem abruptamente em instantes de tempo afastados.

Alguns aspectos do tráfego preservam-se estacionários por longo período de tempo e modificam-se abruptamente, como a luz semafórica. Esta mudança brusca é chamada evento. O termo evento é usado para definir qualquer elemento que muda de estado no sistema modelado. A abordagem “evento discreto” propõe descrever o sistema numa sucessão de estados distintos, evento a evento. A modelagem de eventos discretos, seguramente, implica em grandes economias de tempo computacional, em comparação à discretização segundo a segundo.

Modelos contínuos tratam as mudanças do sistema, ao longo do tempo, como um fenômeno contínuo. Assim, descrevem como o estado do sistema se altera continuamente através do tempo em resposta a estímulos contínuos.

2.3.5 Flexibilidade do tráfego

O tipo de flexibilidade que o tráfego assume na modelagem gera uma importante característica para classificação dos modelos.

Modelos de fluxo ininterrupto assumem que não existem causas fixas de atrasos ou interrupções externas na corrente de tráfego. Tais modelos são adequados para representar *freeways* e rodovias rurais.

Modelos de fluxo interrompido consideram a existência de obstáculos fixos que causam bloqueios temporários e periódicos na corrente de tráfego. Modelos de interseções, modelos de otimização semafórica e demais modelos de redes urbanas constituem um exemplo.

2.3.6 Variabilidade aleatória

Muitos fatores do tráfego são associados a processos onde os efeitos da variabilidade aleatória são importantes.

Os modelos determinísticos desprezam a variabilidade aleatória. Desse modo, as variáveis de entrada e saída somente assumem valores médios e agregados. Em modelagem determinística, um dado de entrada vai sempre produzir o mesmo parâmetro de saída.

Em modelagem estocástica, os resultados são estimados através de variáveis aleatórias. Uma variável aleatória pode ser representada através de um valor agregado associado a uma função de probabilidades, onde uma medida de variabilidade também é informada. A modelagem estocástica é utilizada para representar a incerteza de um processo ou para expressar, na forma de distribuições estatísticas, o efeito de uma variável aleatória nos parâmetros de saída. Os métodos estocásticos são largamente utilizados em modelos de simulação.

2.4 NÍVEL DE AGREGAÇÃO DOS MODELOS

O nível de agregação com que o tráfego é tratado na modelagem define características e propriedades importantes que repercutem na aplicação prática dos modelos. Na presente seção, é descrito sobre o nível de agregação dos modelos de tráfego.

2.4.1 Modelagem macroscópica

As relações atraso-fluxo se aplicam bem para explicar tempos de viagem ao longo de arcos longos. Assim, o uso da modelagem macroscópica é comum em análises de *free-ways* e vias arteriais.

Modelos tradicionais de alocação de tráfego, como o TRIPS, o EMME2 e o TRANPLAN, fazem uso da abordagem macroscópica. As relações simplificadas entre atraso e fluxo conduzem a estimativas satisfatórias de fluxos, para fins de planejamento.

Modelos macroscópicos avaliam o tráfego seção a seção ou trecho a trecho. Além disso, em comparação com os modelos microscópicos, consomem menor volume de dados e exigem menos esforço computacional para serem executados. Desse modo, sua aplicação e manutenção são mais rápidas e acessíveis, tornando-se bastante apropriados para modelar grandes redes.

Uma característica importante dos modelos macroscópicos é que as relações entre seus dados de entrada e as estimativas de saída são diretas. Assim, o usuário possui maior controle sobre a estimação de resultados. A consequência prática é que a calibração de modelos macroscópicos é mais simplificada que dos modelos microscópicos.

O uso da modelagem macroscópica é indicado quando:

- Os elementos a serem analisados não são significativamente sensíveis ou dispensam as interações veículo a veículo.

- A extensão da rede estudada é demasiadamente ampla de modo a inviabilizar o uso de modelos microscópicos.
- O tempo e os recursos para desenvolvimento da modelagem são limitados.

Por outro lado, por tratarem o tráfego de maneira mais simplista, modelos macroscópicos apresentam o risco de fornecerem uma representação menos precisa ou mesmo inadequada do mundo real.

2.4.2 Modelagem microscópica

Modelos microscópicos representam as entidades no tráfego individualmente. Assim, avaliam explicitamente as interações veículo a veículo.

A fundamentação básica dos modelos microscópicos de simulação assume que a movimentação e as interações dos veículos na via se desenvolvem em duas direções: longitudinalmente ao longo do arco, e transversalmente através das faixas na pista.

As interações longitudinais ao longo do arco têm grande repercussão na velocidade e aceleração dos veículos. Em simulação microscópica de tráfego, a movimentação longitudinal na via é representada através de regras ou modelos de *car-following*.

Modelos de *car-following* representam a influência que um veículo precedente – o veículo líder - têm na velocidade ou aceleração do seu veículo sucessor, o veículo seguidor. Assumindo-se que os veículos desejam trafegar a uma velocidade desejada, os modelos de *car-following* assumem que a influência que o veículo líder exerce sobre o seguidor varia conforme a magnitude do afastamento.

A movimentação transversal dos veículos através da pista, associada à troca de faixas, é avaliada por modelos de *lane-changing*. A essência básica desses modelos consiste em identificar um estímulo para mudança de faixa, identificar a faixa alvo, e avaliar se na faixa alvo existem condições para a troca de faixas.

Os estímulos para troca de faixa podem se dar por diferentes motivos, obrigatórios ou não: ultrapassagem para aumento de velocidade, busca de faixa para realizar conversão junto à interseção, ou contornar um obstáculo como faixa proibitiva ou bloqueada.

O processo de mudança de faixa se dá quando os veículos na faixa alvo oferecem condições mínimas exigidas pela manobra. Essas condições podem ser expressas através de distância, tempo, ou ambos.

A representação dos efeitos da variabilidade aleatória em diversos fenômenos do tráfego é propriedade comum de modelos microscópicos de simulação.

Em virtude de apresentarem uma descrição do tráfego mais completa, os modelos microscópicos oferecem a vantagem potencial de oferecer uma replicação mais realista. Porém, paralelamente, exigem maior esforço para implementação.

Em comparação à abordagem macroscópica, a aplicação de modelos microscópicos de simulação é mais complexa. Consome maior volume de dados, maior tempo de implantação, e exige maior esforço computacional. Assim, são mais custosos para serem desenvolvidos, implementados e mantidos.

Modelos microscópicos apresentam maior complexidade lógica e parâmetros para serem calibrados. Assim, é consenso na bibliografia que o processo de calibração é complexo, demorado, e dificultoso.

Simuladores microscópicos oferecem uma representação dinâmica do tráfego, comumente ilustrada através de uma estrutura de animação gráfica. Assim, possibilitam uma melhor compreensão do comportamento do tráfego decorrente da visualização.

2.4.3 Modelagem mesoscópica

Modelos mesoscópicos de tráfego preservam algum nível de desagregação ou na representação das entidades, ou das interações entre elas. A diversidade de abordagens mesoscópicas é ampla.

Por exemplo, manobras de mudança de faixa podem ser representadas para cada veículo individualmente, mas a decisão sendo agregadamente baseada em densidades de faixa, e não nas relações individuais entre os veículos (Lieberman e Rathi, 1997).

Modelos como o TRANSYT (Vicent *et al.*, 1980), desagregam a corrente de tráfego, no tempo e no espaço, na forma de perfis de fluxo cíclicos (Robertson, 1974).

2.5 APLICAÇÃO DE MODELOS

O uso da modelagem de tráfego para a avaliação de políticas de operação e planejamento de transportes compreende a comparação de cenários alternativos. Na prática, o desempenho do cenário de referência, que representa a realidade, é comparado com cenários contemplando modificações propostas.

A implantação de modelos de tráfego segue uma metodologia genérica que, tradicionalmente, é consenso comum na literatura. A seguir, compilamos a discriminação de etapas apresentada por Lieberman e Rathi (1997) e Lind *et al.* (1999).

Preliminarmente, é importante compreender a extensão do problema a ser investigado para então definir os objetivos do estudo, o papel da modelagem, o modelo escolhido, e os elementos de análise. A partir da escolha do modelo, as etapas de implementação são apresentadas:

- (i) concepção dos cenários avaliados;
- (ii) levantamento e codificação de dados;
- (iii) calibração do modelo;
- (iv) validação do modelo;
- (v) modelagem dos cenários avaliados;
- (vi) análise de resultados.

Embora a metodologia apresentada sugira uma relação seqüencial, na prática, o processo pode ser reavaliado ciclicamente até que a modelagem atinja níveis de confiança satisfatórios. Nas próximas seções, a discussão sobre as etapas de aplicação de modelos é ampliada.

2.5.1 Concepção dos cenários avaliados

Na etapa de concepção dos cenários avaliados, definem-se as hipóteses básicas adotadas na modelagem. Essa etapa exige conhecimento do ambiente modelado, e envolve a seleção do modelo utilizado levando-se em consideração o propósito da modelagem e os elementos de análise.

A concepção envolve a escolha e a definição dos elementos a serem representados na modelagem: delimitação da área de estudo, definição do período de análise, e seleção das vias representadas. O critério básico para seleção dos elementos representados é: se o impacto de um elemento no desempenho do tráfego ou nos parâmetros de análise for significativo, é preciso incluí-lo na modelagem.

2.5.2 Levantamento e codificação de dados

A etapa de levantamento de dados objetiva caracterizar o ambiente estudado, subsidiando informações necessárias às etapas de codificação, calibração e validação do modelo.

As fontes de informações envolvem observações em campo, levantamento de projetos e mapas, e a programação operacional implementada pelos órgãos responsáveis. Quando as coletas em campo forem limitadas por questões de viabilidade e custo, Lieberman e Rathi (1997) sugerem aceitar, com cautela, valores referenciais relacionados na bibliografia ou valores *default* dos parâmetros dos modelos.

O levantamento de dados assume importância básica para a modelagem. Lind *et al.* (1999) alerta: “*Não é possível obter qualidade melhor nos resultados que nos dados de entrada*”.

A natureza dos dados atende às necessidades particulares do modelo utilizado, onde a informação precisa ser apropriada com a forma de descrição e o nível de detalhamento compatíveis.

À medida que diminui o nível de agregação da modelagem, aumenta o volume de informações necessárias. A diversidade de dados exigidos em estudos de modelagem acompanha a diversidade de modelos disponíveis.

Genericamente, os dados podem ser agrupados em dois conjuntos: dados da rede viária e dados da demanda.

Os dados da rede descrevem a caracterização geométrica e operacional da rede viária, conforme a exigência do modelo adotado. Via de regra, os dados da rede referem-se ao arco (trecho entre interseções) ou nós (interseções).

São exemplos de dados dos arcos exigidos por modelos microscópicos: comprimento, número das faixas, largura das faixas, faixas exclusivas, pontos de parada, velocidade limite, etc. Exemplos de dados das interseções envolvem as conversões permitidas, programação semafórica, relações de prioridade, boxes para proibição de bloqueio de interseções, etc. (Lind *et al.*, 1999).

A estrutura espacial e a localização de elementos da rede viária pode ser obtida através de mapas e projetos viários, Sistemas de Informações Geográficas (ou GIS - *Geographic Information System*), GPS (*Global Positioning System*), fotos aéreas e imagens de satélite, etc.

A demanda na rede viária pode ser quantificada através de matrizes origem-destino de viagens (matriz O-D), contagens volumétricas, taxas percentuais entre conversões, relação percentual dos diferentes tipos de veículos no tráfego (composição de tráfego), etc.

Modelos de micro-simulação de tráfego exigem informações complementares descrevendo as características operacionais dos veículos e/ou o estilo de dirigir dos motoristas.

2.5.3 Calibração e validação de modelos

A confiabilidade de qualquer simulador depende da sua habilidade em produzir resultados próximos à realidade. Infelizmente, muitas das variáveis de entrada usadas em modelos de simulação são de difícil medição em campo, porém têm substancial efeito no desempenho do modelo (Milam *et al.*, 2001).

Enquanto que os modelos sugerem valores *defaults* que geralmente representam condições médias para parâmetros particulares, é responsabilidade do analista quantificar valores em faixas consistentes com a realidade de campo.

Calibração é o processo de ajustar dados e parâmetros de entrada em um modelo de modo a gerar uma melhor equivalência entre resultados da simulação e o mundo real. A calibração é um processo iterativo no qual o operador ajusta os parâmetros do modelo até que os resultados estimados se apresentem equivalentes às observações de campo (Hourdakis *et al.*, 2003). Além de dados quantitativos, a fase de calibração exige conhecimentos sobre o comportamento do tráfego (Lind *et al.*, 1999).

Segundo Milam *et al.* (2001), os componentes ou parâmetros de um modelo de simulação que requerem calibração envolvem: características do fluxo de tráfego; aspectos comportamentais dos motoristas; e operações de controle de tráfego.

A validação se ocupa de apresentar medidas quantitativas de consistência entre a previsão do modelo e medições do mundo real (Rao *et al.*, 1998). Na prática, o analista valida um modelo comparando os parâmetros estimados com as medições de campo, onde as observações que subsidiaram a calibração não são usadas na validação.

A validação operacional faz uso de testes estatísticos como comparação de médias assumindo-se distribuição normal, onde define-se um intervalo de confiança para a população de médias. Outras análises estatísticas utilizadas envolvem séries temporais, e análises de variâncias.

A etapa de calibração é executada alternativamente com a etapa de validação, até que o modelo atinja desempenho considerado satisfatório. Assim, os parâmetros em calibração são ajustados e os resultados estimados pelo modelo são comparados com os referenciais de validação, até que a equivalência seja considerada satisfatória.

O propósito do modelo determina o tipo e o nível de detalhe das informações de campo a serem comparadas com os parâmetros de saída. Em modelos macroscópicos, as informações para subsidiar a etapa de validação e calibração são parâmetros agregados que se referem a arcos ou trechos. Tais parâmetros resumem-se a:

- fluxos;
- velocidades médias;
- tempos de viagem;
- densidade.

Em modelos microscópicos, a diversidade de informações que pode ser utilizada é mais ampla. Além dos parâmetros agregados utilizados pelos modelos macroscópicos, também podem ser adotadas informações que caracterizam a natureza microscópica do tráfego. A seguir, são apresentados exemplos:

- fluxos em seções pontuais de arcos ou faixas;
- distribuições de velocidades em arcos, trechos da rede, ou seções pontuais;
- tempos de viagem entre pontos da rede;
- headways em seções pontuais de arcos;
- tempo total em fila nos arcos;
- comprimento médio ou máximo de fila nos arcos, em metros ou em veículos,
- paradas em aproximações viárias;
- atrasos em interseções ou em trechos da rede.

O processo de validação e calibração em modelos microscópicos é consideravelmente mais complexo que em modelos macroscópicos e mesoscópicos. Envolve mais variáveis, maior volume de dados, e consome mais tempo (Algers *et al.*, 1997).

Hourdakís *et al.* (2003) destacam que não existe uma rotina sistemática para calibração de modelos de micro-simulação de tráfego, e que a bibliografia apresenta procedimentos aplicados para modelos particulares em estudos particulares. Geralmente, um micro-simulador robusto oferece numerosos parâmetros para serem calibrados. Na prática, os

resultados são obtidos por *tentativa-e-erro*, através de um processo demorado e pouco eficiente.

Pesquisas mais recentes, entretanto, apresentam métodos alternativos à tentativa e erro para solução do problema de calibração em micro-simulação de tráfego. Hourdakís *et al.* (2003), através de algoritmos de otimização, obtiveram ganhos de tempo substanciais na identificação da solução ótima.

Outra dificuldade, sobre a validação de modelos microscópicos, é a carência de pesquisas sobre diretrizes definindo faixas de erro aceitáveis para os testes de validação (Milam *et al.*, 2001).

Um problema chave nos procedimentos de calibração é modelar adequadamente os fluxos através dos gargalos da rede. Isso ocorre porque as capacidades viárias definem o nível de congestionamento, o que gera grande impacto no comportamento do tráfego e na estimativa de atrasos (Lind *et al.*, 1999).

2.5.4 Modelagem dos cenários e análise de resultados

Essa etapa envolve a execução do modelo, a comparação dos resultados nos relatórios de saída, e a avaliação da animação gráfica.

A etapa de aplicação de modelos e análise dos resultados pode ser vista como um experimento estatístico rigoroso (Lieberman e Rathi, 1997). O nível de sofisticação nas análises varia conforme exigência do usuário.

Em se tratando de modelos estocásticos, é necessário avaliar os resultados associados a múltiplas rodadas. A bibliografia sugere rodar dez execuções com sementes estocásticas diferentes (Lind *et al.*, 1999; Liu, 1994).

2.5.5 Análises de sensibilidade

As análises de sensibilidade são conduzidas de modo a permitir um melhor entendimento sobre a modelagem. Tais análises pressupõem alterar valores de um dado de entrada particular, e avaliar o respectivo impacto nos parâmetros de saída de interesse.

As análises de sensibilidade podem ser conduzidas de três diferentes maneiras: mudando-se valores de parâmetros; modificando-se a geometria da rede; e mudando-se o controle de tráfego, como por exemplo, mudando-se os tempos semafóricos (Lind *et al.*, 1999).

Em modelagem de simulação microscópica e estocástica, o processo de análise de sensibilidade consome grande quantidade de tempo pois exige múltiplas rodadas.

Análises de sensibilidade são amplamente utilizadas na etapa de calibração de modelos pois permitem avaliar o impacto dos parâmetros ajustados nas variáveis de saída que orientam o processo.

Na etapa de avaliação de resultados da modelagem, análises de sensibilidade permitem identificar valores limite dos dados de entrada associados a uma condição específica na rede, como o nível de saturação. Assim, quando da comparação de cenários, análises de sensibilidade ajudam a identificar a faixa de dados de entrada associada a uma determinada conclusão específica.

2.6 COMPARAÇÃO DE MODELOS

A variedade de abordagens nos estudos de comparação de modelos é tão ampla quanto a diversidade de modelos disponíveis. Modelos são comparados frente a inúmeros aspectos, através de diferentes metodologias.

Estudos mais generalistas simplesmente classificam diversos modelos segundo características gerais, aplicabilidade, etc. Geralmente, consistem numa revisão bibliográfica desenvolvida por órgãos governamentais e institutos de pesquisa, que objetiva avaliar a adequação de modelos para determinada finalidade (Boxill e Yu, 2000; Smith, 1992; Algers *et al.*, 1997).

Estudos acadêmicos são geralmente mais focalizados, comparando dois modelos (ou pouco mais) frente a um determinado aspecto específico, como a escolha de rotas ou a estrutura de simulação. Uma abordagem muito utilizada envolve a replicação de uma mesma área de estudo e a comparação de resultados, através dos modelos avaliados.

A seguir, destacamos alguns estudos sobre comparação de modelos de simulação.

Rakha e Van Aerde (1996) comparam o TRANSYT e o INTEGRATION aplicados a uma rede teórica com dois semáforos. O estudo compara os resultados dos modelos, confrontando também contra uma abordagem analítica macroscópica e outra microscópica. Os modelos obtiveram desempenhos similares, onde as diferenças dos tempos de viagem não superaram 5%. O estudo conclui que, embora o TRANSYT se constitua um padrão não-oficial para a avaliação de semáforos sincronizados, o INTEGRATION oferece vantagens tais

como avaliar a re-alocação do tráfego, controle semafórico em tempo real, e propagação de filas.

Prevedouros e Wang (1998) aplicaram o CORSIM, o INTEGRATION e o WATSim a três pequenas redes em Honolulu, no Hawaii, e compararam as estimativas de fluxos e velocidades com observações de campo. O estudo concluiu que, embora os modelos obtivessem resultados razoáveis na maioria dos arcos, houve diferenças significativas. As razões das diferenças são pouco exploradas. O estudo alerta sobre as dificuldades práticas de calibração de modelos microscópicos.

Bloomberg e Dale (2000) aplicaram o VISSIM e o CORSIM a redes congestionadas em Washington. Através de análises estatísticas, os autores avaliam a variabilidade dos tempos de viagem estimados pelos dois modelos. O estudo aponta que os modelos, ambos microscópicos, são fundamentados teoricamente de maneira similar. Porém, alerta sobre diferenças em *car-following* e aceitação de brechas. Os autores recomendam a aplicação de modelos diferentes em um mesmo estudo. Através da comparação de resultados, é possível reavaliar os dados de entrada e aprimorar a modelagem.

Sunil e Rathi (1996) comparam o NETSIM, NETFLO I e o NETFLO II aplicados a redes teóricas com controle semafórico por tempo fixo em sincronismo. A comparação conclui que os modelos apresentaram divergências sobre a estimação de atrasos e velocidades. O NETSIM sempre estimou menores velocidades, o NETFLO II obteve os maiores valores, e o NETFLO I apresentou valores intermediários.

Hall *et al.* (2000) aplicaram e compararam três modelos (INTEGRATION, CORSIM e FREQ), em condições super-saturadas. Os autores destacam as diferenças entre os modelos na avaliação da capacidade viária. O FREQ trata a capacidade como um dado de entrada informado diretamente pelo analista. O CORSIM avalia a capacidade como consequência do comportamento micro-simulado dos veículos. O INTEGRATION adota uma abordagem intermediária: calcula a capacidade a partir de um fluxo de saturação, que sofre reduções devido ao comportamento modelado dos veículos.

Os autores alertam também que, em condições super-saturadas, pequenas distorções na capacidade geram grandes impactos nos parâmetros de saída. Em análises de sensibilidade, onde os modelos foram aplicados a outros locais de teste, os autores identificaram diferenças significativas entre as velocidades estimadas. As diferenças percebidas não seguem um padrão definido, sendo bastante sensíveis a pequenas variações nos dados como a semente aleatória, por exemplo.

Crowther (2001) estuda detalhadamente as simulações do CORSIM e do INTEGRATION, confrontando resultados, apresentando as fundamentações teóricas dos modelos, comparando resultados, e explicando as diferenças. O estudo avalia o desempenho dos modelos em condições saturadas e não-saturadas, em vias arteriais urbanas e *freeways*, e confronta diversos parâmetros de saída como filas, atrasos, velocidades, paradas.

2.7 ESTUDOS PRÁTICOS COM O SATURN E O DRACULA

A literatura reporta inúmeros estudos de aplicações do SATURN. Algumas publicações de destaque histórico, descrevem aplicações em Liverpool (Choraffa e Ferreira, 1983), Manchester (Matzoros *et al.*, 1987), Bangkok (May *et al.*, 1992), Kuwait (McSheen e Hale, 1989).

No Brasil, o SATURN foi aplicado em Porto Alegre em diferentes estudos, conforme Pinto *et al.* (1998), Cybis *et al.* (1999), Freitas *et al.* (2001). Em Clark *et al.* (2000), o DRACULA é utilizado para simular medidas de gerenciamento de tráfego e transporte público. O SATURN e o DRACULA têm sido aplicados em conjunto em alguns estudos como: Araújo e Cybis (2002), Muizelaar (2002), Aden (1995).

Aden (1995) avalia os efeitos e a variabilidade dos tempos de viagem do DRACULA, decorrentes de variações nas características dos veículos e nos níveis de demanda. O estudo foi desenvolvido a partir de uma rede de Otley (Inglaterra) e avalia condições urbanas de tráfego. Nas análises, o autor confronta os resultados do DRACULA com o SATURN, e com duas abordagens analíticas.

Araújo e Cybis (2002) aplicam o SATURN e o DRACULA em estudo de caso. O estudo compara as descrições de dados dos modelos, e avaliou um modelo DRACULA obtido a partir dos parâmetros *default*. Na realidade, a investigação constitui a análise preliminar do presente trabalho de pesquisa.

Muizelaar (2002) descreve a modelagem de um anel viário em York, através dos dois modelos. Lind *et al.* (1999) descreve a aplicação do DRACULA em uma rede com duas interseções, em Leeds. O fluxo nas faixas foi identificado através de filmagens em vídeo.

2.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresentou a fundamentação teórica geral sobre modelagem e simulação de tráfego. A fundamentação teórica apresentou conceitos básicos acerca do

assunto pesquisado, contextualizando e focalizando o tema de trabalho, e subsidiando o desenvolvimento dos experimentos. Foram abordadas classificações diversas dos modelos de tráfego, concentrando-se no nível de agregação; estudos sobre comparação de modelos; etapas metodológicas de aplicação de modelos, e aplicações do SATURN e do DRACULA.

O próximo capítulo, apresenta e confronta a fundamentação teórica dos modelos SATURN e DRACULA, focalizando as estruturas de simulação. A partir das comparações teóricas, é possível compreender o comportamento relativo dos modelos, sustentando as análises nos testes desenvolvidos no Capítulo 4 e no estudo de caso desenvolvido no Capítulo 5.

CAPÍTULO 3 - O SATURN E O DRACULA

3.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

O Capítulo 3 apresenta e compara a fundamentação teórica dos modelos SATURN e DRACULA. As análises concentram-se nas estruturas de simulação dos modelos.

Inicialmente, apresenta-se uma visão geral dos modelos. Em seguida, são discutidas as hipóteses e características fundamentais das estruturas de simulação: são abordados os dados de entrada, as características específicas de modelagem, e os parâmetros de saída. As análises destacam as principais diferenças entre os dados de entrada, e entre os processos de estimação de atrasos, tempos de viagem e velocidades.

A seção 3.2 descreve o SATURN, a seção 3.3 aborda o DRACULA. A seção 3.4, descreve a estrutura de uso conjunto dos modelos. Por fim, na seção 3.5, as estruturas de simulação são confrontadas teoricamente e comparadas.

3.2 O SATURN

O SATURN (*Simulation and Assignment of Traffic to Urban Road Networks*) é um modelo de alocação de tráfego, que incorpora uma estrutura de simulação de interseções viárias. O modelo foi originalmente concebido, no final da década de setenta, para avaliação de esquemas de gerenciamento de tráfego em redes viárias urbanas (Hall *et al.*, 1980). Desde

então, o SATURN vem sendo constantemente aperfeiçoado e atualmente, possui mais de 300 usuários em 30 países (Van Vliet e Hall, 2000). O modelo foi desenvolvido no *Institute for Transport Studies*, da Universidade de Leeds, na Inglaterra.

Na sua forma de uso completa, os módulos de alocação e simulação do SATURN operam associados (Van Vliet, 1982). Porém, esses módulos são independentes entre si. Assim, o SATURN pode ser utilizado isoladamente como um modelo convencional de alocação de tráfego, ou como um simulador de interseções. A descrição completa do modelo é encontrada em Van Vliet e Hall (2000).

O SATURN oferece uma série de recursos como: atualização e estimação de matrizes a partir de contagens volumétricas, otimização de tempos semafóricos, e outros. Permite alocação de tráfego segundo vários princípios: tudo-ou-nada, equilíbrio de Wardrop, puramente estocástica, equilíbrio estocástico do usuário – SUE (*Stochastic User Equilibrium*), e alocação de tráfego para múltiplas classes de usuários. A fundamentação teórica sobre princípios de alocação de tráfego pode ser encontrada em Ortúzar e Willumsen (1994).

O princípio de escolha de rotas padrão, adequado para modelagem de redes urbanas congestionadas, é baseada no Princípio do Equilíbrio de Wardrop (Wardrop, 1952). O algoritmo de escolha de rotas padrão é o Algoritmo de Frank-Wolfe (Frank e Wolfe, 1956).

A fase de alocação do modelo é essencialmente macroscópica. Na fase de simulação, entretanto, o fluxo de tráfego entre interseções adjacentes é desagregado em perfis de fluxo cíclicos. Assim, a simulação do SATURN pode ser classificada como mesoscópica.

3.2.1 Estrutura de execução do SATURN

O SATURN é um modelo estático. Assim, avalia um único estado da rede, correspondente às condições médias no período de análise.

O modelo exige dois conjuntos de dados do período modelado: a descrição da rede viária e a quantificação da demanda na forma de matriz origem-destino.

O uso tradicional do modelo para redes urbanas compreende um processo iterativo, que envolve as fases de alocação e simulação, alternadamente. A partir de um padrão de demanda preliminar na rede, a simulação estima os atrasos e define curvas atraso-fluxo das conversões. Em seguida, a fase de alocação efetua uma nova escolha de rotas levando em consideração as relações de atraso definidas na fase de simulação precedente. As duas fases do modelo se alternam, até que critérios de convergência sejam satisfeitos. Por fim, após a estimação definitiva dos fluxos nos arcos e dos atrasos na rede, é possível analisar os

resultados. A Figura 3.1 ilustra o *loop* alocação-simulação, que compõe a estrutura de execução do SATURN.

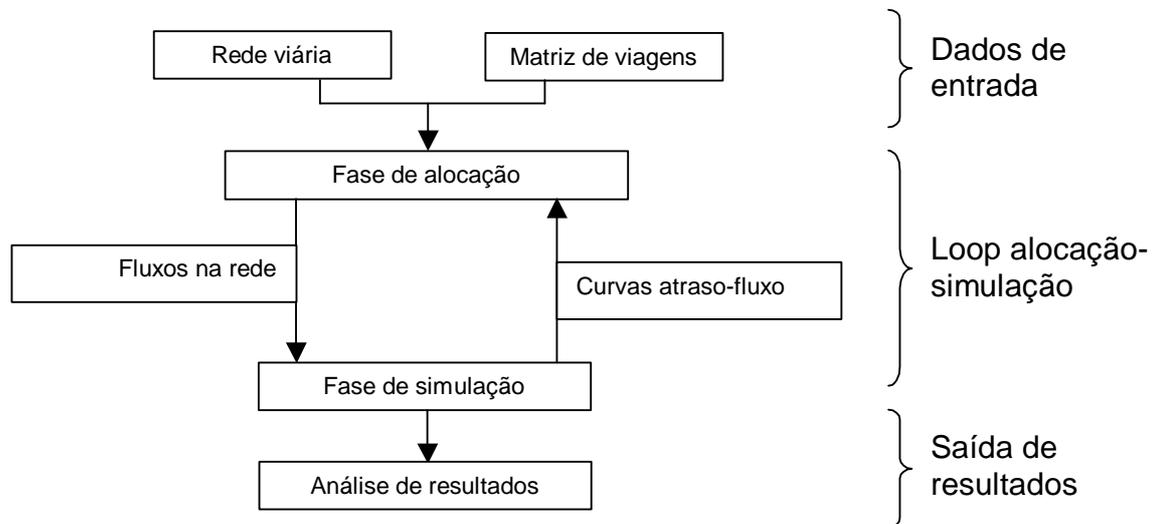


Figura 3.1 – Estrutura básica de operação do SATURN.

Quando o SATURN é utilizado exclusivamente como um modelo de alocação de tráfego, as relações fluxo-velocidade e as capacidades dos arcos são definidas pelo usuário.

3.2.2 Simulação no SATURN

Van Vliet (1982) apresenta uma visão geral da estrutura de simulação do SATURN. O manual do modelo (Van Vliet e Hall, 2000) descreve a simulação em maior profundidade.

A estrutura de simulação de tráfego é baseada nas conversões das interseções. A função básica da simulação é estimar os atrasos, as curvas atraso-fluxo, e as capacidades viárias dependentes de fluxos.

O modelo assume que os veículos trafegam com velocidade constante ao longo do arco, havendo formação de fila vertical na interseção de jusante. Os atrasos são avaliados nas filas, junto às interseções viárias, em reação ao controle de tráfego.

3.2.2.1 Dados de entrada

Descrição da rede

Os dados da rede viária são baseados na interseção, nos arcos, nas faixas, ou nas conversões. Os dados da interseção são: o tipo de interseção (prioritária/semáforizada/rotatória) e as coordenadas cartesianas. Para cada arco, informa-se o comprimento, a velocidade no arco, e o número de faixas. Para cada conversão, os dados consistem em: fluxo

de saturação, as faixas disponíveis, e um código indicando as relações de prioridade entre fluxos opostos.

O fluxo de saturação expressa a taxa máxima de veículos equivalentes que a conversão permite, supondo não haver controle de tráfego nem interferência de quaisquer outras correntes de fluxo. O fluxo de saturação decorre do comportamento dos motoristas ao dirigir, e agrega o efeito de aspectos geométricos da interseção como o raio de giro, o número e a largura das faixas, e a declividade da via. Os fluxos de saturação exercem grande influência na modelagem, pois definem as capacidades das conversões, conforme apresentado adiante.

O SATURN faculta duas abordagens para avaliar a velocidade do arco: velocidade média de cruzeiro constante (independente do fluxo); ou velocidade definida a partir de relações fluxo-velocidade.

Adotar a velocidade média de cruzeiro como constante pressupõe que a influência do fluxo nos atrasos ao longo do arco é desprezível frente à magnitude dos atrasos na interseção viária. A abordagem caracteriza um padrão de tráfego específico, e é embasada em estudos que revelam que, em redes urbanas, as velocidades médias ao longo dos arcos são fortemente correlacionadas com características operacionais e geométricas da via tais como o tipo de pavimento, largura das faixas, declividade, perturbação do entorno, existência de canteiro central, etc. (Van Vliet e Hall, 2000).

A abordagem onde a velocidade média do arco varia segundo relações fluxo-velocidade, é adequada para modelar arcos longos, comuns em rodovias rurais e interurbanas. O dado de entrada sobre o arco corresponde à velocidade média em fluxo-livre.

Ao longo do presente estudo, foi avaliada a abordagem da velocidade média de cruzeiro, que é apropriada para a modelagem de redes urbanas.

Demanda de tráfego

A demanda de tráfego no SATURN é expressa na forma de uma matriz origem-destino de viagens (matriz O-D). A célula com linha “i” e coluna “j” quantifica a taxa de viagens, em Unidades de Veículo Padrão por hora (UVP/h), da zona de origem “i” para a zona de destino “j”.

A UVP (Unidade de Veículo Padrão) representa o efeito médio que o veículo de referência, correspondente ao automóvel, exerce no tráfego no que se refere ao consumo da capacidade viária e na estocagem em filas. A sua dimensão agrega o comprimento e o afastamento entre os veículos.

3.2.2.2 *Elementos específicos de modelagem*

Aceitação de brechas

Em interseções prioritárias, a negociação de passagem entre correntes de tráfego conflitantes se dá através de aceitação de brechas. O modelo baseia-se na probabilidade da corrente secundária encontrar uma brecha, em algum instante do tempo, que seja simultânea para todos os fluxos principais opostos.

O modelo de aceitação de brechas assume uma distribuição aleatória (*Poisson*) no tráfego atravessado. Assim, despreza os efeitos de chegadas cíclicas. Na prática, em redes urbanas com arcos de comprimento reduzido, sabe-se que o tráfego costuma chegar concentrado em pelotões periódicos. Assim, a menos que os parâmetros de brecha sofram ajustes compensatórios, o SATURN tende a superestimar os atrasos e subestimar a capacidade (Van Vliet e Hall, 2000).

A variável “GAP” representa a brecha mínima, em segundos, aceita por um veículo na corrente secundária. O SATURN permite definir três tipos e valores de variável “GAP”, constantes no tempo, conforme o tipo de conflito na interseção: interseção prioritária, rotatória e *merge*. Conflitos tipo *merge* são comuns em rodovias rurais, onde o fluxo secundário se mescla na faixa externa da via principal.

Quando o fluxo principal está saturado, a tendência é que o modelo de aceitação de brechas subestime a capacidade da via secundária. Na prática, sabe-se que à medida que aumenta o tempo de espera por uma brecha, os motoristas reduzem sua tolerância. Desse modo, passam a aceitar brechas menores ou mesmo chegam a forçar passagem, criando espaço de entrada no fluxo principal. Para representar esse efeito, o SATURN permite que o usuário defina uma capacidade de entrada mínima.

Perfis de fluxo cíclicos

O fluxo entre interseções adjacentes é desagregado no tempo e no espaço, através de perfis de fluxo cíclicos. A representação dos perfis de fluxo exerce grande influência na estimativa de atrasos das interseções semaforizadas em sincronismo.

A essência repetitiva dos ciclos semaforicos habilita o SATURN a simular apenas o período de um ciclo. Assumindo que o ciclo é fracionado em intervalos de tempo iguais, o método identifica o fluxo passando por pontos pré-definidos do arco ou interseção, para cada instante simulado. O método adotado (Robertson, 1974) equivale àquele utilizado no modelo TRANSYT.

Os perfis de fluxo são desagregados por conversão, onde cada conversão tem quatro perfis associados. O padrão IN representa o fluxo à montante do arco. O padrão ARRIVE representa o fluxo chegando na interseção, a jusante do arco. O padrão ACCEPT representa o tráfego efetivamente desenvolvendo a conversão, na caixa da interseção. O padrão OUT representa o fluxo saindo da caixa da interseção.

O padrão ARRIVE é derivado do padrão IN a partir de um modelo de dispersão de pelotões. O padrão ACCEPT é derivado das capacidades e do controle de tráfego na interseção. O padrão OUT é derivado dos padrões ARRIVE e ACCEPT, e contribui para o padrão IN da próxima conversão a jusante.

Atrasos aleatórios

Variações na taxa de chegada dos veículos tornam-se mais importantes à medida que a demanda aproxima-se do ponto de saturação. Se a condição média é quase saturada, pequenas variações aleatórias poderão causar supersaturações temporárias que duram vários ciclos até dissipar. A consequência desse efeito aleatório é aumentar os atrasos médios, em condições próximas à saturação. A teoria de perfis de fluxo cíclicos, na sua essência básica, despreza esse fato.

O SATURN considera explicitamente os atrasos decorrentes de chegadas aleatórias para as vias secundárias de interseções prioritárias. Já para as interseções semaforizadas e as vias principais de interseções prioritárias, os atrasos são divididos em duas componentes: um atraso uniforme que é adicionado a um atraso aleatório. O atraso uniforme é calculado a partir da teoria de perfis de fluxo cíclicos. O atraso aleatório médio é calculado conforme metodologia adotada no modelo TRANSYT. A configuração *default* do SATURN, entretanto, suprime o cálculo do atraso aleatório.

Blocking back

Num arco saturado, ao longo do tempo a fila cresce, podendo exceder a capacidade de estocagem. Assim, a fila atinge a interseção à montante e invade o outro arco, reduzindo sua vazão de saída. A consequência desse efeito é que o arco à montante tem sua capacidade reduzida.

O SATURN modela os efeitos de *blocking-back* reduzindo as capacidades das conversões à montante, à mesma taxa. O fator redutor é função da fila que invadiu o arco, conforme descrito em Van Vliet e Hall (2000).

Curvas atraso-fluxo nas conversões

Além dos atrasos nas interseções, o módulo de simulação define as curvas de atraso-fluxo das conversões. Essas funções calculam o atraso em decorrência do fluxo. No “loop” alocação-simulação, o módulo de alocação faz uso das relações atraso-fluxo para estimar os tempos de viagem na rede.

3.2.2.3 Parâmetros de saída

Tempos de viagem e atrasos

Atrasos no SATURN se referem ao tempo estacionário nas filas nas interseções. O tempo de cruzeiro corresponde ao percurso através do arco com velocidade constante de cruzeiro. O tempo total de viagem é a soma de atrasos e tempos de cruzeiro.

O SATURN classifica os atrasos em dois grupos: atrasos transientes e atrasos além-da-capacidade. Os atrasos transientes são associados a condições não-saturadas e correspondem, em interseções semaforizadas, ao tempo despendido nos vermelhos semafóricos. Já os atrasos além-da-capacidade, ocorrem em interseções saturadas e correspondem ao tempo de formação das filas crescentes.

A estimativa de atrasos é função das capacidades viárias das conversões: assim que o fluxo de demanda atinge a saturação, os atrasos crescem rapidamente. Como o SATURN assume taxas de chegada constantes ao longo do período modelado, os atrasos crescem linearmente a partir do ponto de saturação.

Capacidade viária

A estimativa das capacidades é função dos fluxos de saturação das conversões e do controle de tráfego, entre outros.

Nas interseções semaforizadas, a capacidade é definida pelo produto entre o fluxo de saturação e a porcentagem do tempo de luz verde. Nas interseções prioritárias, a capacidade é estimada com base em aceitação de brechas.

A distribuição do fluxo nas faixas da aproximação viária influencia a estimativa de capacidade das conversões. Quando as conversões se desenvolvem em faixas exclusivas, o fluxo de cada conversão é alocado nas correspondentes faixas reservadas. Assim, a sua capacidade é uniformemente distribuída entre as faixas que permitem a conversão.

Se duas ou mais conversões compartilham faixas, a escolha de faixa é determinada com base no Princípio do Equilíbrio de Wardrop:

“Todas as faixas usadas por um movimento particular de conversão tem igual atraso na linha de retenção e todas as faixas não usadas tem um atraso igual ou maior” (Van Vliet e Hall, 2000)

No caso de faixas compartilhando diferentes conversões, a capacidade da conversão em cada faixa é calculada de diferentes maneiras, caso a faixa esteja aquém ou além da saturação, conforme detalhado por Van Vliet e Hall (2000).

Fluxo de demanda e fluxo real

O SATURN classifica o fluxo de tráfego na rede de duas maneiras: fluxo real e fluxo de demanda.

Os fluxos de demanda são estimados pela fase de alocação do SATURN. Para a árvore de rotas entre um par O-D, os fluxos de demanda totalizam a quantia de viagens na célula correspondente da matriz O-D.

Já os fluxos reais, são estimados pela fase de simulação e consistem numa parcela dos fluxos de demanda. O fluxo real de cada conversão é limitado pela sua capacidade viária, e expressa o volume de tráfego que a conversão efetivamente atende.

O fluxo real é sempre menor ou igual ao fluxo de demanda. Quando o fluxo de demanda supera o fluxo real, significa que a seção está saturada e a diferença entre eles representa a demanda retida na forma de filas crescentes.

3.3 O DRACULA

O DRACULA (*Dynamic Route Assignment Combining User Learning and microsimulAtion*) está sendo desenvolvido pelo *Institute for Transport Studies* da Universidade de Leeds, desde 1993 (Liu et al., 1995). Nas seções que seguem, o modelo é apresentado.

3.3.1 Visão geral do DRACULA

O micro-simulador de tráfego DRACULA faz parte de um modelo mais amplo, com outras funções. A proposta original do DRACULA é compor uma nova geração de modelos urbanos de transportes, em relação às abordagens tradicionais baseadas em equilíbrio. A escolha de rotas baseada no equilíbrio pressupõe uma boa experiência dos usuários sobre a rede, que somente é estabelecida em longo prazo. A avaliação de políticas avançadas de transportes como sistemas responsivos de controle de tráfego ou sistemas de orientação de

rotas, entretanto, exige uma avaliação mais detalhada sobre a variabilidade no tráfego (Liu *et al.*, 1995).

O objetivo do DRACULA é representar a evolução do tráfego em redes urbanas, avaliando os efeitos entre o estado da rede e a demanda, considerando a variabilidade dentro-dia e dia-a-dia (Liu *et al.*, 1995). O modelo avalia o comportamento particular de cada indivíduo.

Timms *et al.* (1997) classificou o modelo completo como um “supermodelo” à medida que é composto por três sub-modelos independentes: o modelo de escolhas, o modelo de aprendizado, e o micro-simulador de tráfego. Os modelos de aprendizado e escolhas compõem a modelagem de demanda, que avalia o comportamento de uma população de potenciais viajantes, numa base dia-a-dia.

O modelo de escolhas define para cada potencial viajante - a partir da sua experiência passada e da sua percepção atual sobre a rede – se ele efetivamente viaja, a rota a ser adotada, e o instante de partida. Essas informações são passadas para o micro-simulador de tráfego, que reproduz a trajetória de cada indivíduo através da rede, estimando tempos e custos de viagem nos arcos. Ao final do dia, o modelo de aprendizado armazena num arquivo histórico de cada indivíduo, os tempos e os custos de viagem experimentados. O arquivo histórico influenciará as escolhas nos próximos dias (Liu, 2000). Maiores detalhes sobre a modelagem de demanda são encontrados em Watling (1995). Esta estrutura encontra-se em fase de pesquisa.

Atualmente, o micro-simulador tem autonomia, sendo utilizado separado do modelo de demanda. Está disponível no mercado e foi lançado comercialmente como DRACULA – MARS (*Microscopic Analysis of Road Systems*) (Liu, 2000). Na prática, o micro-simulador tem sido mais empregado em conjunto com o SATURN, ou mesmo isoladamente.

3.3.2 Simulação no DRACULA

A simulação no DRACULA é descrita em Liu (1994), Liu *et al.* (1995) e Liu (2000). O manual do modelo (Liu, 2000) apresenta a simulação com maiores detalhes.

O micro-simulador de tráfego DRACULA representa a trajetória dos veículos ao longo de rotas pré-especificadas. A evolução dos veículos na rede é estimada através de modelos de *car-following* e *lane-changing*, considerando o comportamento desejado dos motoristas, a sinalização, e o controle nas interseções e arcos.

3.3.2.1 Estrutura da simulação

A principal função da simulação é representar a trajetória espaço-tempo dos veículos na rede. A simulação é espacialmente contínua e discreta no tempo. O sistema é atualizado em passos fixos de um segundo.

A simulação é precedida por uma etapa de preparação, que gera o ambiente para o simulador operar. Nessa etapa, o modelo lê os parâmetros que configuram o sistema, e as descrições de rede e demanda. Na fase de preparação, os dados globais sujeitos à modelagem estocástica são definidos aleatoriamente, a partir dos valores médios e variâncias previamente informados.

A cada passo de simulação, são executadas as seguintes operações:

- (i) definição do estado da rede no instante corrente, onde a sinalização semafórica é atualizada conforme a programação;
- (ii) geração de veículos nas origens;
- (iii) atualização do estado dos veículos na rede, onde para cada veículo são realizadas as seguintes operações:
 - através do modelo de *car-following*, atualiza-se a velocidade corrente, a aceleração e posição do veículo;
 - através do modelo de *lane-changing*, avalia-se o desejo e a possibilidade de mudança de faixa;
- (iv) atualização da animação gráfica;
- (v) incremento do relógio do simulador e retorno à etapa (i).

O processo progride, segundo a segundo, até o término do período de simulação.

A animação gráfica do modelo opera em paralelo com o simulador. Assim, o estado da rede é atualizado e visualizado a cada passo de simulação.

O micro-simulador faculta especificar dois períodos adicionais, adjacentes ao período de estudo. O período de *warm-up* precede o período de análise, e reproduz o carregamento gradual da rede. O período de *cooling-off* sucede o período de estudo, e representa o decréscimo das taxas de demanda. A finalidade desses períodos é assegurar níveis realistas de demanda de tráfego na rede durante o período de estudo, justamente quando os parâmetros de saída estão sendo efetivamente registrados.

Os parâmetros de saída do modelo, gravados em relatórios, são referenciados com base em diferentes níveis: para a rede, por tipo de veículo, por arco, por par O-D, por faixa, por indivíduo. O simulador registra atrasos, distâncias percorridas, velocidades instantâneas e médias, número de paradas, tamanho de filas, entre outros parâmetros.

3.3.2.2 *Dados de entrada*

Descrição da rede

A rede é representada por nós, e por arcos divididos em faixas. Os arcos são definidos pelos nós a jusante e montante, velocidade média desejada em fluxo livre, número de faixas, e conversões facultadas na aproximação de jusante. Para cada conversão, é necessário informar as faixas permitidas para a conversão e um marcador de prioridade em relação aos fluxos opostos.

O DRACULA faculty modelar faixas exclusivas para tipo(s) específico(s) de veículo(s). Permite também bloquear uma faixa por determinado período de tempo definido pelo usuário, de modo a modelar incidentes na pista.

Representação da demanda

A partir dos fluxos nas rotas e da composição do tráfego, a demanda de tráfego é composta por veículos que são originados, individualmente, nos pontos de origem de tráfego.

Características dos veículos

O DRACULA permite modelar seis diferentes tipos de veículos. Cada veículo que entra na rede possui um lote de características particulares descrevendo aspectos comportamentais dos motoristas e parâmetros do veículo. As características são definidas aleatoriamente a partir dos valores médios e variâncias previamente informadas, para cada tipo de veículo.

As características por tipo de veículo do veículo são:

- a) tipo e comprimento do veículo;
- b) taxas normais de aceleração e desaceleração;
- c) taxas máxima e mínima de aceleração e desaceleração;
- d) fator de velocidade.

Consiste num fator constante particular do veículo, que define a sua velocidade desejada. A velocidade desejada de cada veículo num arco é determinada pelo produto entre o fator de velocidades do veículo e a velocidade desejada do arco.

- e) distância mínima de afastamento em relação ao veículo à frente;

- f) fator de aceitação de brechas ou fator de risco.

Consiste num fator multiplicador que expressa a agressividade dos motoristas, no modelo de *lane-changing*. O GAP é inicialmente definido conforme o tempo de espera do veículo na interseção, e então é fatorado pelo fator de risco particular do veículo.

O tempo de reação dos motoristas é constante e equivale a 1 segundo.

A partir das características dos veículos e dos demais parâmetros comportamentais do DRACULA, é possível modelar diferentes níveis de agressividade dos motoristas.

Variabilidade aleatória

No DRACULA, as variáveis aleatórias são especificadas pelo seu valor médio e pela variância. A partir da definição casual de uma semente estocástica particular, o modelo atribui um valor específico à variável aleatória, segundo uma distribuição normal. A partir daí, a simulação tem início considerando aquele conjunto particular de valores de dados gerados aleatoriamente.

A variabilidade aleatória no DRACULA atua em dois níveis: variabilidade global e variabilidade dos veículos. A variabilidade global na rede assume como variáveis aleatórias: velocidade desejada média dos arcos; volume de tráfego nas rotas. A variabilidade em nível dos veículos envolve as características dos veículos e a distribuição de *headways* na geração de tráfego.

3.3.2.3 Elementos específicos de modelagem

Geração de tráfego

Cada origem tem sua própria distribuição de *headways*, onde a taxa média de partida é equivalente ao fluxo de veículos previamente informado.

A distribuição de *headways* pode ser definida através de intervalos constantes ou distribuição exponencial transladada negativa. Se não houver espaço viário imediatamente a jusante do ponto de entrada, os veículos se mantêm em fila vertical aguardando para entrar na rede.

Modelo de car-following

O modelo de *car-following* representa as interações longitudinais dos veículos na rede. Calcula a velocidade corrente do veículo a partir da sua velocidade desejada, em resposta à velocidade e distância em relação ao veículo da frente. Dependendo da magnitude do

afastamento, o modelo é classificado em três regimes: movimento livre, movimento seguidor, movimento seguidor aproximado.

Em movimento livre o veículo acelera e desacelera livremente de modo a manter sua velocidade desejada. Ocorre quando o veículo está suficientemente afastado do veículo precedente de modo a não sofrer influências do entorno.

O veículo em movimento seguidor tem sua velocidade corrente controlada pelo veículo precedente. A velocidade é função do afastamento e da velocidade do veículo à frente.

Quando o veículo encontra-se em movimento seguidor aproximado, está tão próximo do veículo precedente que o modelo considera a predisposição para parar, em caso de freada brusca. Trafega à uma velocidade de segurança, conforme o modelo de Gipps (1981).

Em todos os casos, os motoristas não desejam exceder suas velocidades desejadas, nem superar seus limites de aceleração (mínimo e máximo).

Modelo de lane-changing

O modelo de *lane-changing* avalia a movimentação transversal dos veículos na pista, reproduzindo troca de faixas. Divide-se em três etapas: (1) identificação e definição do tipo de estímulo para mudança de faixa; (2) seleção da faixa alvo e (3) mudança de faixa caso existam brechas aceitáveis.

O DRACULA considera cinco tipos de estímulo para mudança de faixa, decorrentes de diferentes motivos. O estímulo pode decorrer da necessidade de um ônibus acessar um ponto de parada, da necessidade do veículo contornar um incidente ou evitar uma faixa proibitiva à circulação, ou da necessidade de acessar uma faixa apropriada para a próxima conversão. Esses três motivos são obrigatórios. O estímulo pode decorrer também do desejo do veículo mover-se para uma faixa reservada, ou do desejo de ultrapassar um veículo de modo a aumentar a velocidade instantânea.

O veículo muda de faixa somente se a faixa alvo oferecer condições: as brechas disponíveis, em relação ao par de veículos imediatamente ao lado, devem superar os valores mínimos de segurança. No caso de mudança de faixa obrigatória, a brecha mínima aceitável reduz-se à medida que o veículo se aproxima do ponto alvo. Se o veículo estiver muito próximo e não ocorrer brecha satisfatória à mudança de faixa, a velocidade reduz-se podendo o veículo parar à espera de uma brecha. Quando a velocidade na faixa alvo for inferior a um limite pré-determinado, o modelo assume que algum motorista pode frear de modo a criar uma brecha para o veículo desejando entrar. Essa atitude é definida aleatoriamente.

Simulação das interseções

Os veículos começam a reagir ao controle de tráfego da interseção a partir de uma distância pré-especificada da linha de retenção. Somente o primeiro veículo reage à interseção; os demais reagem ao veículo precedente segundo o modelo de *car-following*. O DRACULA modela três tipos de interseção: semafórica, prioritária e rotatória.

Quando a luz verde libera uma conversão num semáforo, o primeiro veículo verifica se o caminho está livre e, em caso afirmativo, move-se através da interseção segundo regras de *car-following*.

No instante em que o sinal muda para amarelo, um veículo muito próximo da linha de retenção segue adiante se houver tempo disponível para percorrer a interseção à velocidade corrente. Caso contrário, decide aleatoriamente se pára ou segue adiante - situações nas quais poderá imprimir suas taxas de desaceleração ou aceleração máximas, respectivamente. É permitido que o veículo invada o início do período de vermelho apenas se, ao acender a luz amarela, a distância da linha de retenção for tão curta de modo que não seja possível parar à taxa máxima de desaceleração.

Nas interseções prioritárias, cada indivíduo tem o valor do seu “GAP” do modelo de aceitação de brechas calculado a partir do tempo de espera na interseção. O DRACULA assume uma lei geral na rede para definir o decréscimo do GAP, mas também faculta leis individuais para arcos secundários específicos.

3.3.2.4 Parâmetros de saída

Tempos de viagem e atrasos

Os atrasos, assim como os demais parâmetros de saída do DRACULA, são contabilizados e registrados a cada passo de simulação.

A cada passo, o modelo compara a velocidade corrente dos veículos em relação à sua velocidade desejada. A margem de diferença determina o atraso dos veículos. Assim, o quociente entre a distância percorrida durante o passo e essa margem de diferença define o tempo de atraso.

O tempo total de viagem de cada veículo corresponde ao tempo da jornada necessário para percorrer um trecho específico da rede.

O regime estacionário do DRACULA é caracterizado por velocidades inferiores a 0,5 m/s. Assim, os tempos de cruzeiros são contabilizados quando o veículo trafega com velocidades acima desse limite.

Capacidade viária

A capacidade viária não é um parâmetro de saída explicitamente informado pelo DRACULA. Consiste numa propriedade da modelagem, que é decorrente do desempenho dos veículos, na rede viária. Decorre da descrição de rede, das características dos veículos, e dos demais parâmetros comportamentais do modelo.

A supersaturação se revela através da formação de filas crescentes, e da necessidade de uma margem de tempo, além do período de simulação, para esvaziar a rede.

3.4 O USO CONJUNTO DO SATURN E DO DRACULA

Esta seção apresenta o uso conjunto do SATURN com o DRACULA.

O objetivo do uso conjunto é aproveitar as vantagens de ambos os modelos, ampliando os elementos de análise. O uso conjunto presume a transferência automática de informações do SATURN para o DRACULA.

A estrutura básica do SATURN exige dois conjuntos de dados: a descrição da rede viária e a quantificação da demanda na forma de matriz origem-destino. Para o DRACULA, são necessários três conjuntos independentes de informações:

- a) dados da rede viária;
- b) quantificação dos fluxos nas rotas;
- c) características dos veículos e parâmetros comportamentais.

Os fluxos nas rotas são estimados pela fase de alocação de tráfego do SATURN, e são exportados diretamente para o DRACULA, em formatação compatível.

O arquivo de dados para descrição da rede viária possui a mesma formatação para o SATURN e para o DRACULA. Assim, o uso conjunto faculta que o arquivo da rede SATURN possa ser adotado no DRACULA.

Modelos de alocação de tráfego tradicionais estimam os tempos de viagem a partir de relações macroscópicas entre velocidade e fluxo. O SATURN oferece vantagens sobre esses modelos, no que se refere à utilização conjunta com um simulador microscópico: a estrutura mesoscópica de simulação.

A partir dos perfis de fluxo cíclicos, a simulação do SATURN representa explicitamente os efeitos do sincronismo semaforico, que é um fenômeno bem tratado em micro-simulação. Assim, a simulação mesoscópica reduz as divergências de modelagem.

O SATURN oferece recursos para exportar para o DRACULA os dados de uma rede inteira, ou de uma parcela reduzida da rede.

A simulação SATURN oferece outra vantagem: permite distinguir fluxo de demanda de fluxo real. Assim, o modelo estima a retenção de veículos em interseções saturadas através da rede. A partir desse recurso, é possível identificar o fluxo efetivo de veículos num determinado trecho interno à rede, onde os veículos retidos à montante não devem contribuir numa simulação microscópica.

3.5 COMPARAÇÃO DAS SIMULAÇÕES DO SATURN E DO DRACULA

A presente seção compara as estruturas de simulação do SATURN e do DRACULA. As análises são concentradas nos seguintes elementos: descrição de dados; estimação de atrasos, tempos de viagem e velocidades; e modelagem da capacidade viária.

A partir dessa comparação teórica, são levantadas questões sobre o comportamento relativo dos modelos, que são ilustradas nas análises de sensibilidade no Capítulo 4. Na seção 3.5.1, são ressaltadas as principais diferenças conceituais entre os dados dos modelos.

3.5.1 Dados de entrada

Embora seja possível transferir dados diretamente do SATURN para o DRACULA, os modelos assumem conceitos distintos para dados específicos. Além disso, as diferentes estruturas de modelagem exercem diferentes impactos na base de dados comum. A microsimulação, além da descrição de rede e da quantificação dos fluxos nas rotas, exige informações adicionais como as características dos veículos e os parâmetros comportamentais.

3.5.1.1 Descrição de rede

Velocidades nos arcos

A velocidade do arco codificada no arquivo de dados da rede expressa conceitos virtualmente distintos em cada modelo. No SATURN, corresponde à velocidade média de cruzeiro num dado padrão de tráfego. No DRACULA, corresponde à velocidade desejada média em fluxo livre.

Naturalmente, a expectativa é que velocidades desejadas em fluxo livre sejam maiores que velocidades médias de cruzeiro pois as velocidades de cruzeiro agregam os atrasos ao

longo do arco. Essa diferença tende a se acentuar à medida que aumentam as interações entre os veículos.

A fim de caracterizar as diferentes velocidades desejadas dos tipos de veículo, o DRACULA define a variável *fator de velocidades*. A velocidade desejada de cada veículo, num arco, é definida pelo produto entre o fator de velocidades e a velocidade codificada do arco.

Uma importante questão a ser avaliada é: “*o produto entre o fator de velocidades e a velocidade de percurso do SATURN constitui uma estimativa satisfatória da velocidade desejada no DRACULA?*”

Fluxos de saturação

Os fluxos de saturação das conversões, necessários para definição das capacidades viárias no SATURN, são dados ignorados pela micro-simulação no DRACULA.

O tratamento da capacidade viária no DRACULA é descrito na seção 3.3.2.4. Os atributos do arquivo de dados da rede que contribuem nessa estimativa são: a alocação de faixas por conversão, o controle de tráfego, o comprimento e a velocidade do arco.

3.5.1.2 Demanda de tráfego

Os fluxos no SATURN são agregados e expressos em UVP/h. Quando o SATURN exporta os fluxos para o DRACULA, essa magnitude se preserva. O DRACULA, entretanto, pressupõe a descrição de demanda em unidades de veículos, de diferentes classes. Assim, o DRACULA oferece parâmetros que permitem decompor o fluxo expresso em UVP/h. A composição do tráfego no DRACULA é informada através de taxas percentuais para cada tipo de veículo.

Quando da exportação automática de fluxos, o SATURN permite extrair os fluxos de demanda ou os fluxos reais. A seleção do tipo de fluxo a ser exportado para o DRACULA, depende do nível de saturação da rede e das dimensões relativas entre a rede original do SATURN e rede extraída para micro-simulação no DRACULA.

Em redes não-saturadas, o fluxo de demanda é igual ao fluxo real, e a escolha do tipo de fluxo exportado é indiferente. Em redes saturadas, ocorrem duas situações, conforme a extensão da rede extraída para micro-simulação em relação à rede original.

Quando a extensão da rede micro-simulada equivale à rede original do SATURN, a demanda exportada corresponde aos fluxos de demanda.

Quando a rede micro-simulada constitui uma parcela reduzida da rede SATURN, com gargalos saturados além da linha imaginária limítrofe, a demanda exportada corresponde aos fluxos reais. Assim, evita-se que a demanda retida nos gargalos à montante da linha limítrofe não contribua, erroneamente, na seção da rede extraída para micro-simulação.

3.5.2 Aceitação de brechas

A estimativa de aceitação de brechas no SATURN é probabilística. É calculada a partir da probabilidade de haver brecha simultânea, em algum instante do tempo, nos fluxos opostos à corrente de tráfego secundária. No DRACULA, a tentativa de aceitação de brechas é avaliada, a cada passo, para os veículos aguardando na aproximação secundária.

Apesar do conceito similar que a variável GAP assume nos modelos, formas de modelagem tão diferentes podem implicar que, eventualmente, um mesmo valor numérico de GAP gere atrasos significativamente diferentes.

Outra diferença importante é que o SATURN assume valores de GAP constantes no tempo. O recurso que o modelo oferece para evitar a estimação de capacidade excessivamente reduzida quando houver indisponibilidade de brechas devido a elevados volumes de tráfego na via preferencial, é a definição de uma capacidade mínima de entrada. Já o DRACULA, permite modelar o decréscimo do GAP à medida que aumenta o tempo de espera dos veículos.

3.5.3 Parâmetros de saída

3.5.3.1 *Tempos de viagem e atrasos*

Atrasos

Os atrasos assumem significados diferentes em cada modelo, sendo estimados através de maneiras distintas. No SATURN, o conceito de atraso está associado ao tempo em fila junto à interseção viária. Já no DRACULA, os atrasos são contabilizados a cada passo e expressam o acréscimo no tempo de viagem devido diferença entre a velocidade corrente no passo e a velocidade desejada no arco.

Nas interseções prioritárias, os atrasos no SATURN são estimados pelo modelo de aceitação de brechas. Entre interseções semaforicas adjacentes, os atrasos são simulados a partir da teoria de perfis de fluxo cíclicos. Já no DRACULA, os atrasos são contabilizados a cada passo de simulação, e agregam os efeitos do controle de tráfego na interseção e das interações entre os veículos no arco.

Em decorrência dessas divergências, os valores dos atrasos estimados pelos modelos devem apresentar diferentes magnitudes.

A teoria de perfis de fluxo cíclicos do SATURN avalia os efeitos do sincronismo semaforico no cálculo dos atrasos. O DRACULA também representa o sincronismo através da micro-simulação. Desse modo, é válido destacar que os modelos reproduzem o mesmo efeito, porém de maneiras distintas.

Tempos de cruzeiro

O tempo de cruzeiro estimado pelo SATURN corresponde ao tempo de percurso ao longo do arco, sendo calculado pelo quociente entre o comprimento do arco e a velocidade de cruzeiro.

O DRACULA assume outro conceito. Os tempos de cruzeiro correspondem à situação onde os veículos trafegam a velocidades maiores que o limite do regime estacionário. Velocidades inferiores a 0,5 m/s caracterizam o regime estacionário.

Tempos totais de viagem

Os tempos totais de viagem, no SATURN ou no DRACULA, correspondem ao somatório dos tempos despendidos para percorrer determinado trecho da jornada. O parâmetro agrega os atrasos e os tempos de cruzeiro e, embora esses conceitos de tempo parciais sejam efetivamente diferentes entre os modelos, os tempos totais de viagem assumem significados equivalentes.

Velocidade geral

O parâmetro de saída “velocidade geral” reflete o tempo total de viagem para percorrer uma determinada distância. Assim, o parâmetro assume o mesmo significado no SATURN e no DRACULA.

3.5.3.2 Modelagem de capacidades viárias

A capacidade numa aproximação viária depende de três fatores associados: da impedância à circulação oferecida por características físicas da via naquela seção; da composição de tráfego e dos volumes relativos de conversões; e do comportamento dos motoristas ao dirigir, naquelas condições. A avaliação desse fenômeno assume abordagens bastante diferenciadas entre as modelagens macro, meso ou microscópica.

No SATURN, o usuário define os fluxos de saturação das conversões e o modelo estima a capacidade da aproximação viária a partir do controle de tráfego e do

compartilhamento de faixas nas conversões. O fluxo de saturação agrega tanto as restrições à circulação no local da conversão, como o comportamento dos motoristas.

No DRACULA, a capacidade viária não é um parâmetro estimado explicitamente. As taxas de fluxo que efetivamente atravessam as aproximações viárias são consequência do comportamento agregado dos veículos decorrente da micro-simulação. Para fins desse estudo, o fluxo efetivo máximo equivale ao conceito de capacidade viária.

No SATURN, a ação do usuário do modelo na estimação de capacidades é baseada em cada conversão independente. Através do fluxo de saturação e da definição de faixas por conversão, o usuário tem controle direto sobre a capacidade viária de cada aproximação.

No modelo DRACULA, a ação do usuário é mais complexa. A modelagem dos fluxos efetivos depende da alocação de faixas das conversões e das características das entidades individuais, cujos efeitos se dão sistematicamente em toda a rede. Essa diferença é corroborada por *Lind et al.* (1999), que alerta sobre as diferenças no tratamento da capacidade viária conforme o nível de agregação dos modelos.

A seção 3.2.2.2, destaca que o modelo de aceitação de brechas do SATURN despreza o sincronismo semafórico do fluxo principal. Desse modo, Van Vliet e Hall (2000) alertam que o modelo pode subestimar a capacidade de vias secundárias em interseções prioritárias.

No DRACULA, o agrupamento de veículos em pelotões é representado em qualquer tipo de controle. Assim, interseções prioritárias no SATURN podem ter a capacidade subestimada em relação ao DRACULA.

Redes próximas à saturação

Em modelagem de tráfego, a representação do ponto de saturação é muito importante pois os atrasos aumentam muito em condições congestionadas. Assim, a representação de cenários com níveis de demanda próximos da saturação requer cuidados pois distorções marginais nos dados podem gerar grandes impactos nos resultados.

Os fluxos na rede SATURN são constantes ao longo do período modelado, e são definidos de forma determinística pela fase de alocação.

A representação do tráfego na simulação microscópica é dinâmica, e se dá de maneira aleatória, a partir da distribuição de *headways*. Além disso, os veículos gerados assumem estilos de dirigir com diferentes níveis de agressividade.

Em consequência dessas características, a representação de cenários em torno do ponto de saturação assume comportamentos distintos em cada modelo. No SATURN, a transição entre o estágio congestionado e não-congestionado é abrupta, e se dá a partir do momento que o fluxo supera a capacidade calculada. Pequenos acréscimos marginais na taxa de demanda aumentam os atrasos significativamente.

No DRACULA, a variabilidade dos *headways* acaba gerando diferentes taxas de fluxo, em torno do valor médio, nos diferentes intervalos de tempo. Assim, taxas de fluxo ocasionais com valor acima da média podem gerar congestionamentos transitórios, porém de grande impacto no desempenho da rede. Eventuais agrupamentos de veículos com características associadas a pouca agressividade poderão ocasionar o mesmo efeito.

A Figura 3.2 ilustra esse comportamento (supondo uma descrição de rede específica submetida a níveis crescentes de demanda).

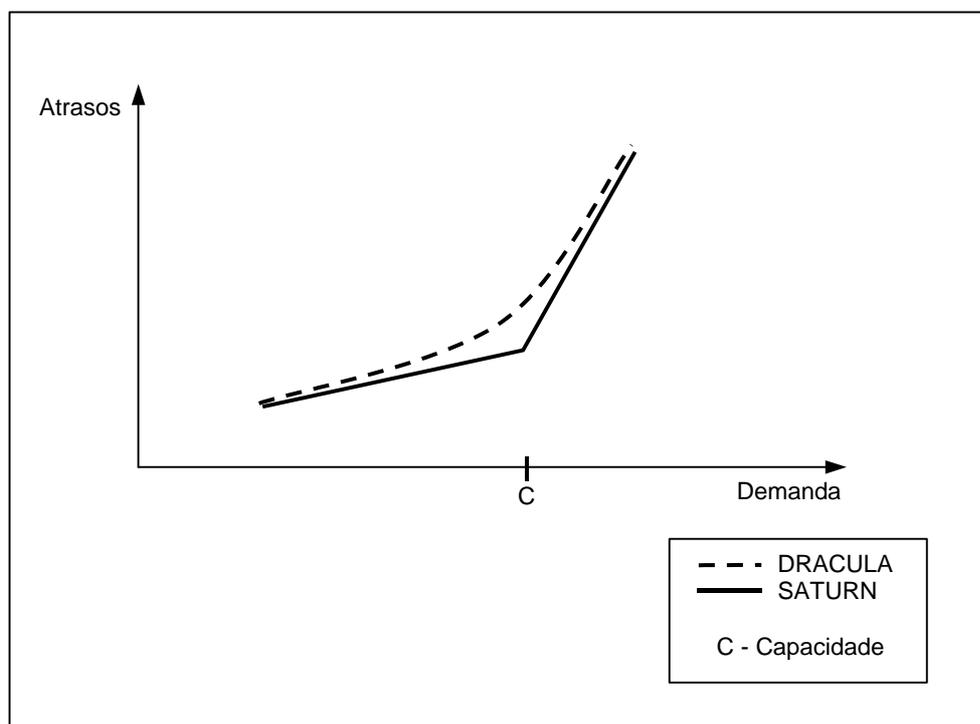


Figura 3.2 – Variação dos atrasos com a demanda (SATURN e DRACULA)

Assim, em condições quase-saturadas, a expectativa é que o SATURN subestime os tempos de viagem em relação ao DRACULA.

3.6 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O Capítulo 3 apresentou e comparou a fundamentação teórica dos modelos SATURN e DRACULA, concentrando-se nas estruturas de simulação. Foram abordados os dados de entrada, as características específicas de modelagem, e os parâmetros de saída.

Através da comparação teórica, é possível concluir que os modelos apresentam diferenças conceituais e estruturais importantes. As análises concentraram-se na avaliação da capacidade viária, atrasos, velocidades, e tempos de viagem.

A confrontação das fundamentações teóricas foi fundamental para subsidiar a concepção dos testes desenvolvidos no próximo capítulo. O Capítulo 4 desenvolve uma série de testes de análises de sensibilidade envolvendo a aplicação dos modelos. Os testes subsidiam, através da avaliação dos resultados estimados, uma melhor compreensão do comportamento relativo entre os modelos SATURN e DRACULA.

CAPÍTULO 4 - TESTES COMPARATIVOS DE ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

4.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresenta uma série de testes de análise de sensibilidade, desenvolvidos com os modelos SATURN e DRACULA. O objetivo desses testes é comparar e avaliar o impacto que dados de entrada específicos têm nos parâmetros de saída de cada modelo. Assim, é possível uma melhor compreensão do comportamento relativo dos dois modelos.

Os testes foram originados a partir das discussões sobre as fundamentações teóricas desenvolvidas no Capítulo 3, e permitem avaliar algumas questões levantadas na seção 3.4.

Cada teste avalia um conjunto de cenários de rede e demanda, onde cada cenário é reproduzido através do DRACULA e/ou do SATURN. Os cenários são compostos por uma estrutura de rede hipotética e simplificada, com poucos arcos.

As redes modeladas em cada teste sofrem variação em alguma variável de entrada, e são submetidas a diferentes níveis de demanda. Os parâmetros de saída avaliados são: os fluxos, atrasos, velocidades e tempos de viagem.

As análises subsidiam conclusões importantes sobre a aplicação de modelos DRACULA, especialmente quando a definição de rede no DRACULA é obtida diretamente a partir do SATURN.

Os testes de análise de sensibilidade desenvolvidos avaliam:

(i) Variação da capacidade no DRACULA em função da velocidade desejada.

A capacidade viária constitui um importante elemento da modelagem, que repercute em todo o desempenho do modelo. O presente teste ilustra a variação da capacidade modelada pelo DRACULA em função da velocidade desejada.

(ii) Variação das velocidades geral e de cruzeiro, tempos de viagem e atrasos em função do tamanho do arco e do nível de demanda, em duas configurações de rede:

a) Teste 2 A: arco sem controle de tráfego na interseção de jusante;

b) Teste 2 B: arco com controle de tráfego na interseção de jusante.

O tempo total de viagem e a velocidade geral constituem parâmetros de saída muito importantes, constituindo alvo de grande interesse dos analistas. Apesar dos modelos SATURN e DRACULA assumirem que os parâmetros possuem os mesmos significados, os modelos apresentam processos particulares de estimação. Assim, é importante compreender as relações entre a descrição de rede e a estimativa desses parâmetros, em cada modelo.

4.2 TESTE 1 – CAPACIDADE NO DRACULA X VELOCIDADE DESEJADA

Para fins deste trabalho, definimos fluxo efetivo como sendo o volume horário de tráfego, estimado por um modelo, através de uma determinada seção da rede. Assim, em condições de supersaturação, consideramos que o fluxo efetivo máximo corresponde à capacidade viária, naquelas condições.

O Teste 1 avalia como os fluxos efetivos no DRACULA variam em função da velocidade desejada no arco.

No modelo microscópico DRACULA, a capacidade viária é uma propriedade da modelagem que não é expressa através de um parâmetro numérico de entrada ou saída. A capacidade viária modelada é consequência indireta dos diversos parâmetros comportamentais e dados, conforme discutido na seção 3.3.2.4.

Nos modelos do teste, foram adotados os valores *defaults* dos parâmetros comportamentais e características dos veículos do DRACULA. É importante ressaltar que em micro-simulação de tráfego, a capacidade viária é bastante sensível ao conjunto de parâmetros comportamentais.

No teste, a rede foi submetida a níveis de demanda crescentes, até que a animação gráfica revelasse condições de saturação tais como formação de filas crescentes. Foram testados no mínimo seis níveis de demanda, incrementados em 50 veículos/hora. A partir dos relatórios de saída, identificou-se o fluxo efetivo máximo através do gargalo, dentre os cenários avaliados.

4.2.1 Descrição dos cenários

A estrutura de rede consiste num trecho longitudinal reto, com uma faixa, composto por dois arcos. A Figura 4.1 ilustra a estrutura da rede modelada.

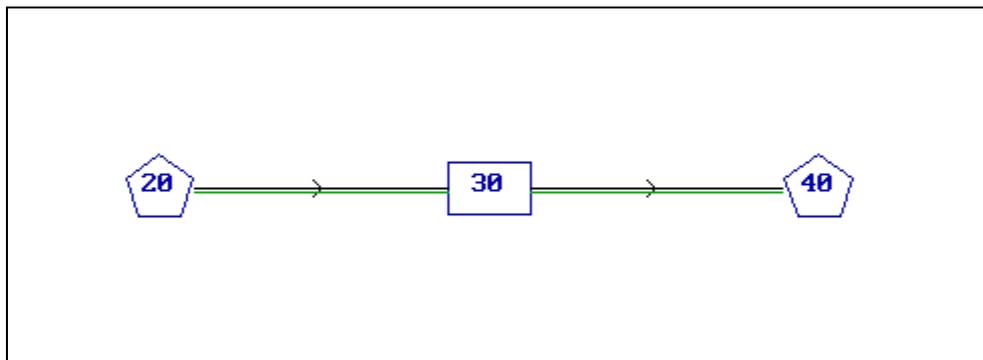


Figura 4.1 – Estrutura da rede modelada

A rede é composta por três nós sequenciais (dois externos e um interno). Vale destacar a simplicidade da rede: o nó central não apresenta controle de tráfego, e significa apenas o ponto de jusante de um arco interno à rede.

Em simulações preliminares com altos níveis de demanda, foi possível identificar a formação de filas no nó 30. Assim, esse ponto se apresentou como o gargalo responsável pela definição da capacidade viária da rede, mesmo não havendo controle de tráfego.

O dado variável foi a velocidade desejada no arco. Foram avaliados cinco valores: 5, 15, 30, 60, e 90 km/h. Vale ressaltar que a finalidade do teste é analisar a sensibilidade do modelo à velocidade desejada. Desse modo, não há necessidade que as velocidades desejadas avaliadas se equivalham a valores típicos de campo, em quaisquer situações. O arco analisado (20-30) possui comprimento de 500 m, suficiente para os veículos acelerarem até a velocidade desejada.

Cada rede foi submetida a níveis crescentes de demanda, entre 400 e 1900 veículos/h, com incrementos de 50 veículos/h.

4.2.2 Resultados

Para os diferentes valores de velocidade desejada avaliados, o DRACULA estimou as seguintes capacidades (fluxos efetivos máximos):

Quadro 4.1 - Variação da capacidade em função da velocidade desejada

Velocidade desejada [km/h]	Capacidade estimada [veic/h]
5	550
15	1089
30	1366
60	1408
90	1780

A Figura 4.2 ilustra a variação da capacidade em função da velocidade desejada no arco.

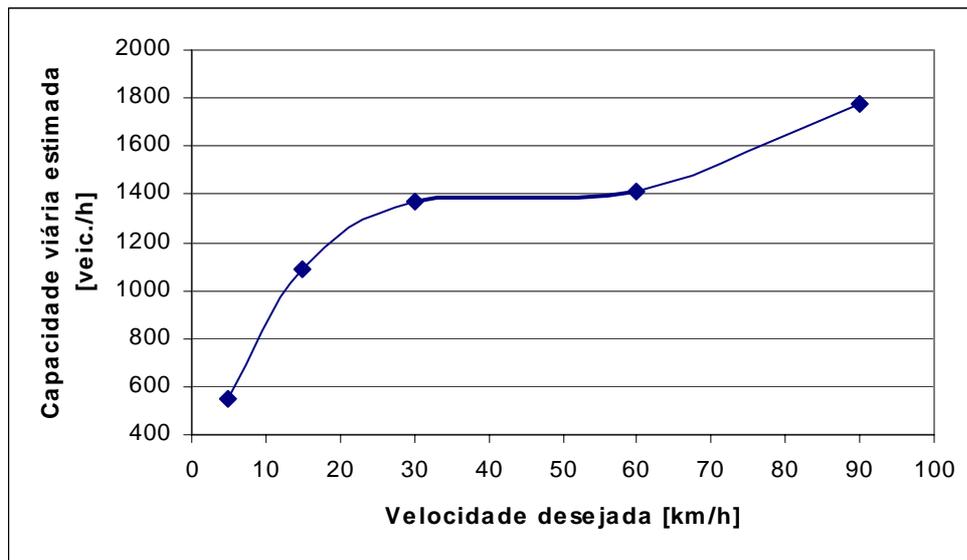


Figura 4.2 - Capacidade viária modelada [veic/h] em função da velocidade desejada

4.2.3 Análise dos resultados

Para os cenários modelados, é possível concluir que o fluxo máximo estimado aumenta em função do aumento da velocidade desejada. Vale salientar que a velocidade geral média dos veículos, na prática, é menor que a velocidade desejada, devido às interações entre os veículos.

Para os valores *defaults* de parâmetros do DRACULA, o fluxo efetivo máximo com velocidade desejada equivalente a 90 km/h, ficou em 1780 veic/h. Para valores de velocidade desejada entre 30 e 60 km/h, o fluxo efetivo máximo variou pouco e o valor médio ficou em 1390 veic/h. Abaixo de 30 km/h, o fluxo decresceu rapidamente com a velocidade desejada: a 15 km/h o fluxo máximo estimado equivale a 1089 veic/h e a 5 km/h, corresponde a 550 veic/h.

Na realidade, a capacidade de um arco está fortemente relacionada à velocidade pontual junto à aproximação. Assim, vale salientar que além da velocidade desejada no arco, outros dados de descrição da rede afetam a modelagem da capacidade viária no DRACULA. Exemplos: a velocidade desejada média do arco à montante, o comprimento do arco, o número de faixas disponíveis nas conversões, o controle de tráfego da interseção, e o compartilhamento de faixas.

4.3 TESTE 2 – VELOCIDADES GERAL E DE CRUZEIRO, TEMPOS DE VIAGEM E ATRASOS X DEMANDA E COMPRIMENTO DO ARCO

O DRACULA permite que o seu arquivo de dados de descrição da rede possa ser importado diretamente do SATURN. Conforme a seção 3.5.1.1, entretanto, as velocidades codificadas no arco assumem diferentes significados para cada modelo. No SATURN, corresponde à velocidade média de cruzeiro, no DRACULA, corresponde à velocidade desejada média em fluxo livre. Devido a essas diferenças, é esperado que para uma mesma descrição de rede, os modelos apresentem resultados diferentes.

O SATURN assume que os veículos percorrem o arco na velocidade de cruzeiro, e os atrasos ocorrem na fila, junto à interseção viária.

No DRACULA, por outro lado, os efeitos das acelerações e desacelerações dos veículos são explicitamente avaliados. À medida que decresce o comprimento do arco, reduz-se o espaço disponível para aceleração após a interseção de montante. Esse comportamento dificulta que, em arcos curtos, os veículos atinjam a velocidade desejada. Da mesma forma, à medida que aumenta a demanda no arco, as interações modeladas entre os veículos aumentam as dificuldades deles atingirem a velocidade desejada.

Para uma mesma descrição de rede, portanto, espera-se divergências de resultados entre o SATURN e o DRACULA. Essas diferenças devem se acentuar à medida que diminui o comprimento do arco e/ou aumenta o carregamento viário.

O presente teste de análise de sensibilidade tem por objetivo avaliar a variação das velocidades geral e de cruzeiro, atrasos, e dos tempos de viagem em função dos comprimentos dos arcos e dos níveis de demanda.

Conforme a seção 3.5.3.1, espera-se que os valores dos atrasos estimados pelos modelos apresentem diferentes magnitudes. O teste permite identificar a ordem de grandeza das diferenças, conforme a configurações de rede e o nível de demanda.

Foram avaliadas duas configurações de rede. Na situação A, o arco não apresenta controle de tráfego a jusante. Na situação B, as interseções a jusante e montante tem controle semafórico. As seções 4.3.1 e 4.3.2 apresentam os testes desenvolvidos conforme as situações A e B, respectivamente.

4.3.1 Situação A: arco sem controle de tráfego

4.3.1.1 Descrição dos cenários

A configuração do cenário foi concebida com o objetivo de ressaltar as diferenças de modelagem entre os modelos estudados. A Figura 4.3 ilustra a estrutura das redes avaliadas. O trecho avaliado corresponde ao arco 10-20.

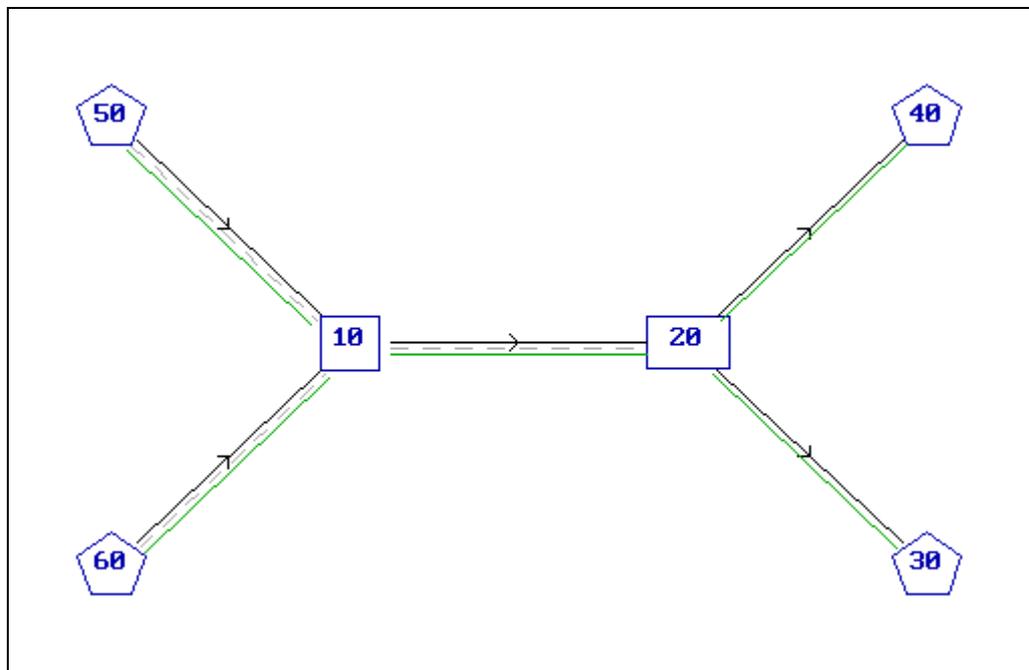


Figura 4.3 - Estrutura padrão das redes modeladas

O trecho central, com duas faixas de rolamento, apresenta alta incidência de interações transversais entre os veículos (trocas de faixa) devido a um conflito de entrelaçamento entre as correntes de tráfego (similar a um “X”): os veículos com origem no nó 50 destinam-se ao

nó 30, e os veículos com origem em 60 destinam-se ao nó 40. A velocidade codificada no arco equivale a 50 km/h.

O nó 10 apresenta controle semafórico. Assim, o trecho imediatamente após a interseção, caracteriza-se como área de aceleração para recuperação da velocidade que se reduziu nas paradas no semáforo.

O nó 20 não apresenta controle de tráfego. Desse modo, o SATURN assume a inexistência de atrasos nessa interseção.

Os arcos externos apresentam comprimentos de 200 m. O comprimento foi definido de modo a garantir capacidade de estocagem suficiente para as filas transientes formadas no semáforo no nó 10.

No presente teste, foram avaliados seis valores diferentes da variável “*comprimento do arco 10-20*”. Os valores testados são apresentados: 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 400 m, e 600 m.

A variável “*demanda de tráfego*” assumiu cinco valores, para cada rede. Os níveis de demanda avaliados equivalem a 260, 860, 1430, 2030, e 2440 veic/h. Os valores foram definidos de modo a caracterizar o comportamento do tráfego desde condições de fluxo livre, até a situação quase-saturada. Uma vez que a capacidade viária modelada pelo DRACULA varia com o comprimento do arco, as relações volume/capacidade não são uniformes para as diferentes redes. O valor máximo de demanda (2440 veic/h), corresponde à situação quase-saturada, na rede de comprimento mais curto (50 m). Os demais valores foram definidos de modo que, entre níveis sucessivos de demanda, a diferença de saturação estimada pelo SATURN (relação V/C), fosse equivalente a aproximadamente 15 %.

No presente teste (situação A), portanto, foram modelados 30 cenários.

4.3.1.2 *Resultados*

Nesta seção, foi avaliado o comportamento relativo entre as velocidades gerais estimadas pelos modelos. Conforme a seção 3.5.3.1, as velocidades gerais do SATURN e do DRACULA agregam os tempos totais de viagem, num trecho viário com comprimento específico. A seguir, são apresentados os valores estimados nos cenários avaliados.

No SATURN, devido à inexistência de controle de tráfego na interseção de jusante, a velocidade geral do arco corresponde à velocidade de cruzeiro, sendo estimado o valor de 50

km/h. O valor constante corresponde, obviamente, à expectativa teórica. Apesar disso, os modelos foram construídos para fins de rigorismo metodológico.

Já no DRACULA, as interações transversais entre os veículos, decorrentes do entrelaçamento entre as correntes de tráfego, geraram atrasos ao longo do arco.

O Quadro 4.2 apresenta as velocidades gerais estimadas pelo DRACULA para os cenários avaliados.

Quadro 4.2 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo DRACULA no Teste 2A

		Níveis de demanda [veic/h]				
		260	860	1430	2030	2440
Comprimento do arco [m]	50	41,5	37,5	32,8	25,6	17,9
	100	44,3	41,5	39,4	27,8	21,3
	150	46,5	43,6	40,4	37,1	25,8
	200	46,4	44,5	42,9	40,5	34,7
	400	47,7	45,4	44,7	42,6	39,5
	600	47,9	46,5	45,1	44,0	40,5

A Figura 4.4 ilustra, através de gráfico de barras, as velocidades gerais estimadas através do DRACULA.

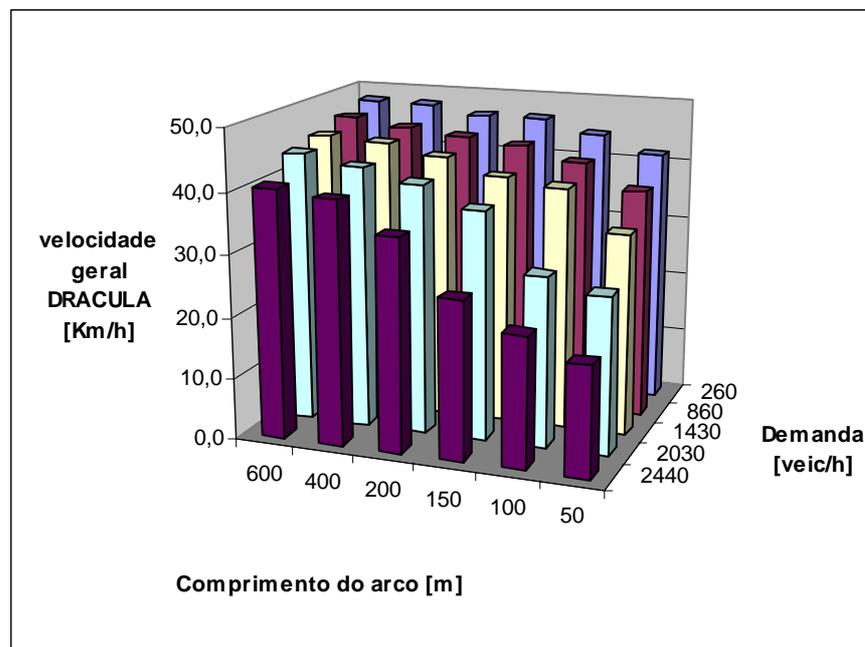


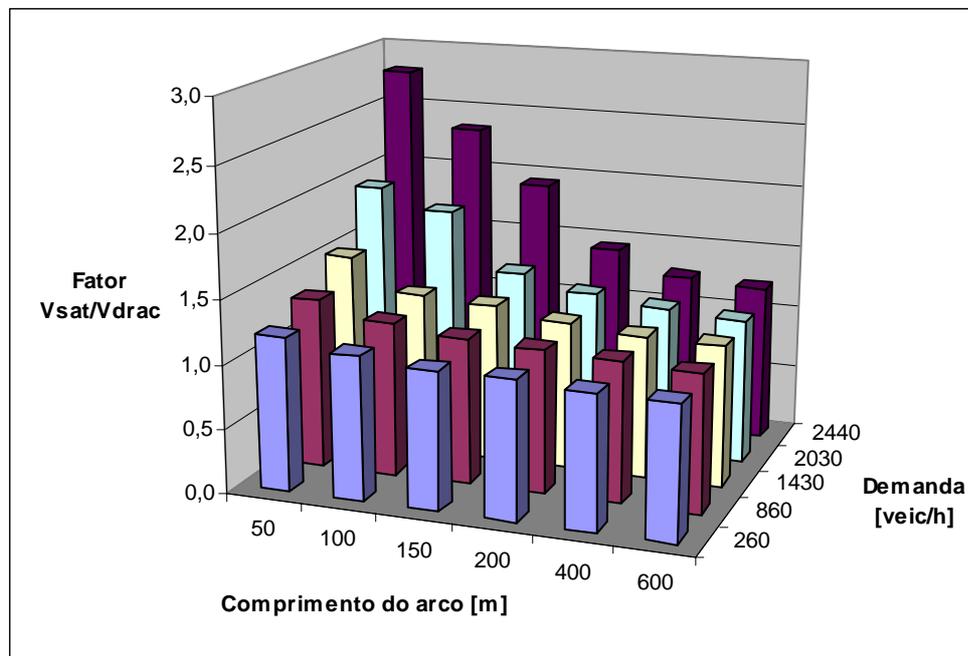
Figura 4.4 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do DRACULA no Teste 2A

Efetuada-se a razão entre as velocidades gerais no arco estimadas pelos modelos, define-se o “fator razão da velocidade geral” (Fator V_{SAT}/V_{DRAC}).

Quadro 4.3 – Razões entre velocidades gerais no Teste 2A

		Níveis de demanda [veic/h]				
		260	860	1430	2030	2440
Comprimento do arco [m]	50	1,2	1,3	1,5	2,0	2,8
	100	1,1	1,2	1,3	1,8	2,4
	150	1,1	1,1	1,2	1,3	1,9
	200	1,1	1,1	1,2	1,2	1,4
	400	1,0	1,1	1,1	1,2	1,3
	600	1,0	1,1	1,1	1,1	1,2

A Figura 4.4 ilustra as razões entre as velocidades geral do SATURN e do DRACULA.

**Figura 4.5 - Razões entre velocidades gerais no Teste 2A (V_{SAT}/V_{DRAC})**

4.3.1.3 Análise dos resultados

É possível identificar que, na maior parte dos cenários, a velocidade geral no arco estimada pelo DRACULA é bem menor que a velocidade geral do SATURN. À medida que aumenta o carregamento ou diminui o comprimento do arco, as divergências se acentuam.

No presente teste, para o cenário de arco mais curto (50 m) e mais carregado (2440 veic/h), a velocidade geral estimada pelo SATURN supera o valor correspondente ao DRACULA num fator de 2,8 (280%). Para os cenários de arcos mais longos (600 m e 400 m), e de menor carregamento (260 veic/h), a velocidade geral DRACULA equivale à estimativa do SATURN.

Para os níveis mais baixos de carregamento (260 veic/h) em todos os comprimentos de arco do teste, o Fator V_{SAT}/V_{DRAC} não supera 1,2.

Para os arcos mais longos (600 m), submetidos a todos os níveis de carregamento do teste, o Fator V_{SAT}/V_{DRAC} também não supera 1,2.

4.3.2 Situação B: arco com controle de tráfego

Na presente seção são avaliados os modelos do Teste 2, assumindo-se controle de tráfego semafórico na interseção a jusante do arco analisado. As análises têm por objetivo avaliar o impacto do comprimento do arco e dos níveis de demanda nos parâmetros de saída dos modelos estudados, em um arco controlado por semáforo.

4.3.2.1 Descrição dos cenários

A rede apresenta estrutura longitudinal, sendo formada por 4 nós. O arco analisado corresponde ao trecho central, delimitado pelos nós 20 e 30. A velocidade codificada no arco equivale a 35 km/h. Ambos os nós 20 e 30 são semaforizados. A Figura 4.6 ilustra a estrutura padrão das redes modeladas no teste.

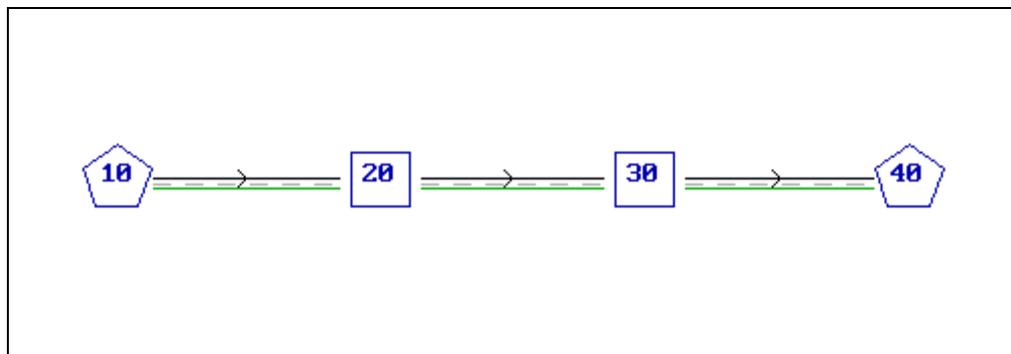


Figura 4.6 - Estrutura padrão das redes modeladas

Os arcos externos apresentam comprimentos de 200 m. O comprimento foi definido de modo a garantir capacidade de estocagem suficiente para as filas formadas nos semáforos.

O comprimento do arco 20-30, submetido à variação, assumiu seis valores diferentes: 50 m, 100 m, 150 m, 200 m, 400 m, e 600 m.

Cada rede foi submetida a cinco níveis crescentes de demanda. Os valores avaliados foram 200, 395, 720, 1035, 1360 veic/h. Assim, foram modelados 30 cenários. Os valores de demanda foram definidos com base nos mesmos critérios do teste (2A), onde os níveis foram definidos de modo a caracterizar o comportamento do tráfego desde condições de baixa demanda até o ponto de saturação.

4.3.2.2 Resultados

Velocidades gerais

A seguir, são apresentados os valores de velocidade geral estimados pelos modelos, para o arco avaliado (20-30).

Quadro 4.4 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo SATURN no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	10,6	10,2	9,5	8,7	7,9
	100	16,2	15,8	14,9	14,0	12,9
	150	19,8	19,3	18,4	17,5	16,4
	200	22,2	21,7	20,9	20,0	18,9
	400	27,2	26,8	26,2	25,4	24,5
	600	29,4	29,1	28,6	28,0	27,3

Quadro 4.5 - Velocidades gerais [km/h] estimadas pelo DRACULA no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	10,6	10,7	9,6	9,0	7,4
	100	16,0	15,5	14,1	13,2	11,9
	150	18,9	18,3	17,5	16,1	14,8
	200	21,7	20,5	19,9	18,4	16,7
	400	27,1	25,9	24,8	23,5	21,8
	600	28,2	28,2	26,8	25,6	24,9

A Figura 4.7 e a Figura 4.8 ilustram, através de gráfico de barras, as velocidades gerais estimadas através dos dois modelos.

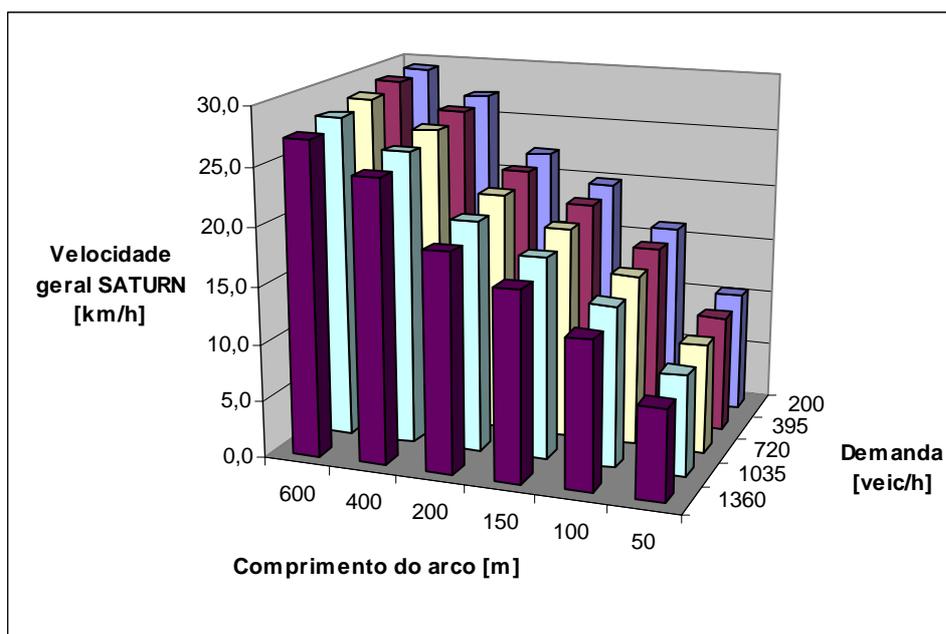


Figura 4.7 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do SATURN no Teste 2B

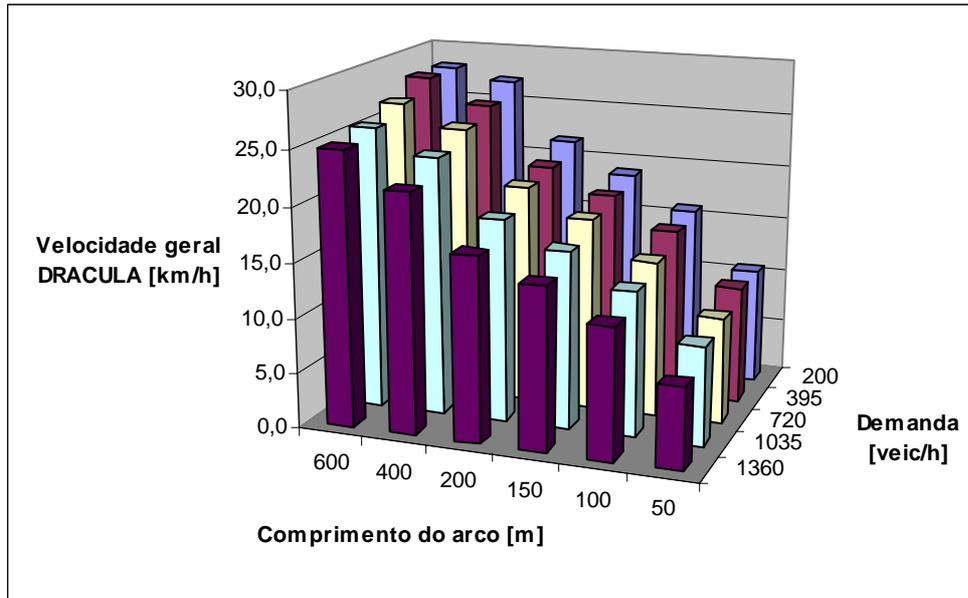


Figura 4.8 - Velocidades gerais [km/h] estimadas através do DRACULA no Teste 2B

Efetuando-se a razão entre as velocidades gerais no arco estimadas pelos modelos, define-se o “*fator razão da velocidade geral*” (Fator V_{SAT}/V_{DRAC}) no Teste 2B.

Quadro 4.6 – Razões entre velocidades gerais no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
	100	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
	150	1,0	1,1	1,1	1,1	1,1
	200	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1
	400	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1
	600	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1

A Figura 4.9 ilustra as razões entre as velocidades gerais estimadas pelos modelos.

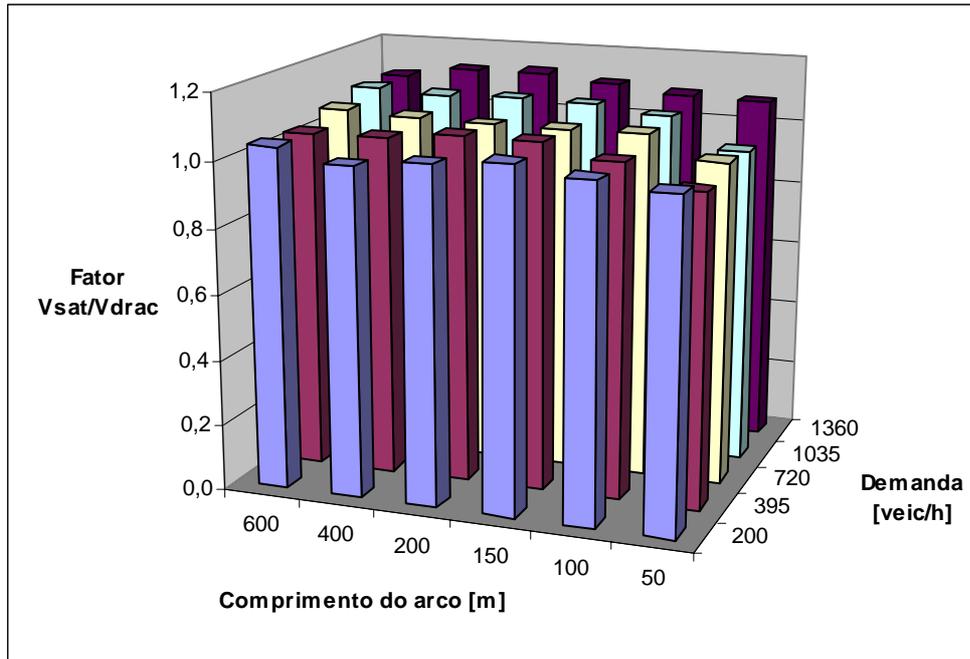


Figura 4.9 - Razões entre velocidades gerais (V_{SAT}/V_{DRAC}) no Teste 2B

Atrasos

A seguir, são apresentados os valores de atrasos estimados pelos modelos.

Quadro 4.7 - Atrasos [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5
	100	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5
	150	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5
	200	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5
	400	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5
	600	11,9	12,6	13,9	15,5	17,5

Quadro 4.8 - Atrasos [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	13,7	13,8	16,1	17,3	22,0
	100	15,2	16,1	19,3	21,6	25,4
	150	16,2	17,7	19,4	23,2	27,3
	200	15,5	17,9	19,2	23,3	28,1
	400	14,1	17,9	19,7	24,1	30,1
	600	17,4	17,8	22,5	26,4	29,5

A Figura 4.10 e a Figura 4.11 ilustram, através de gráfico de barras, os atrasos estimados através dos dois modelos.

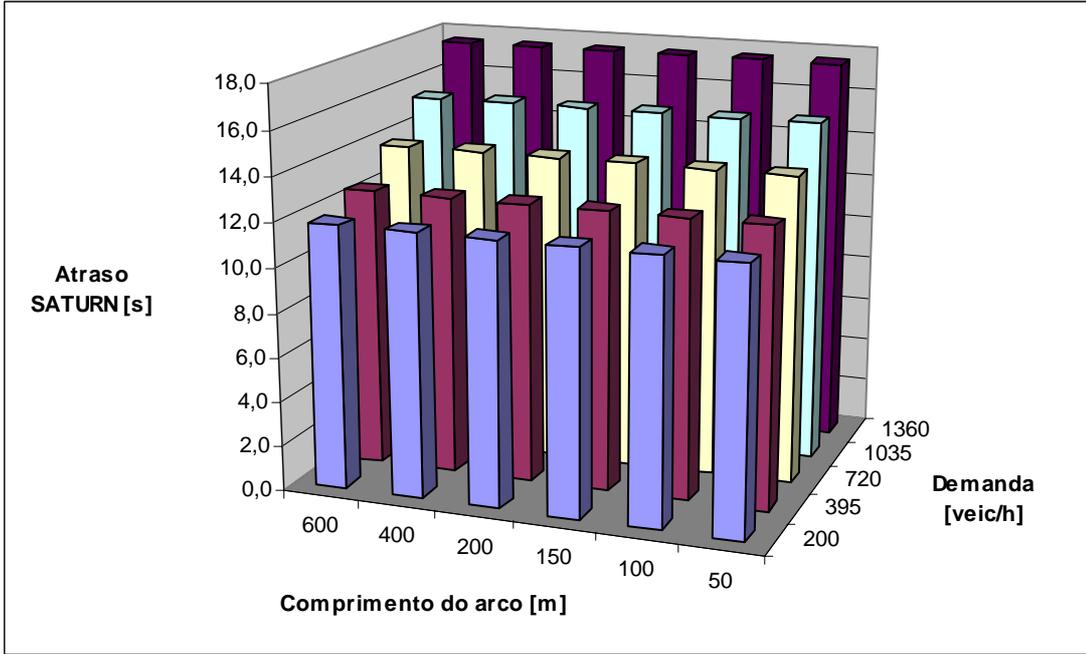


Figura 4.10 – Atrasos [s] estimados através do SATURN no Teste 2B

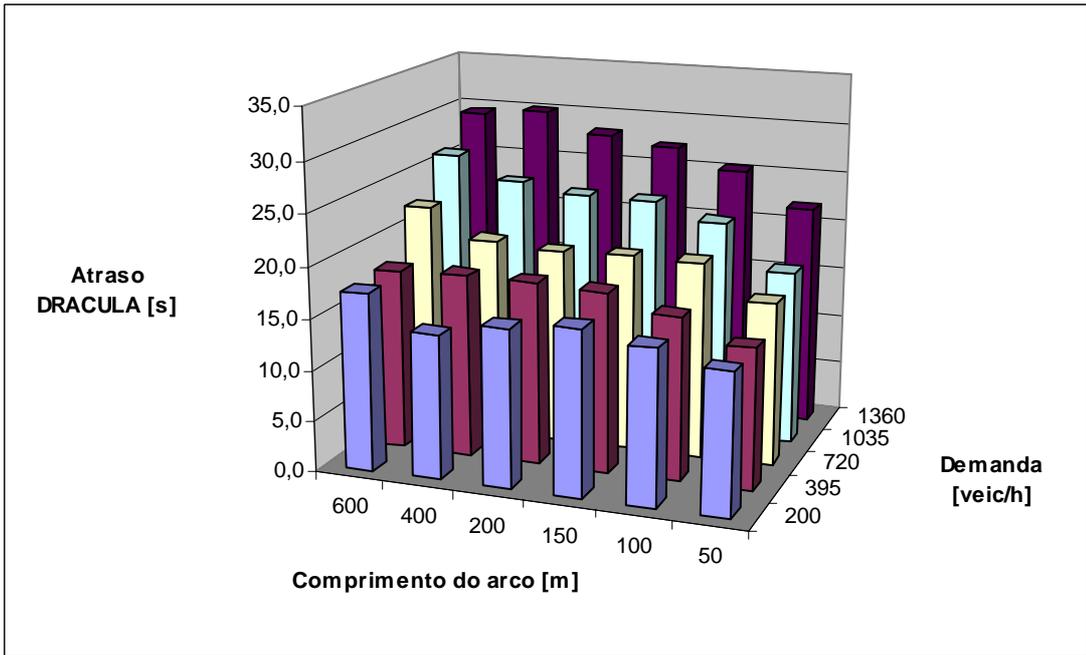


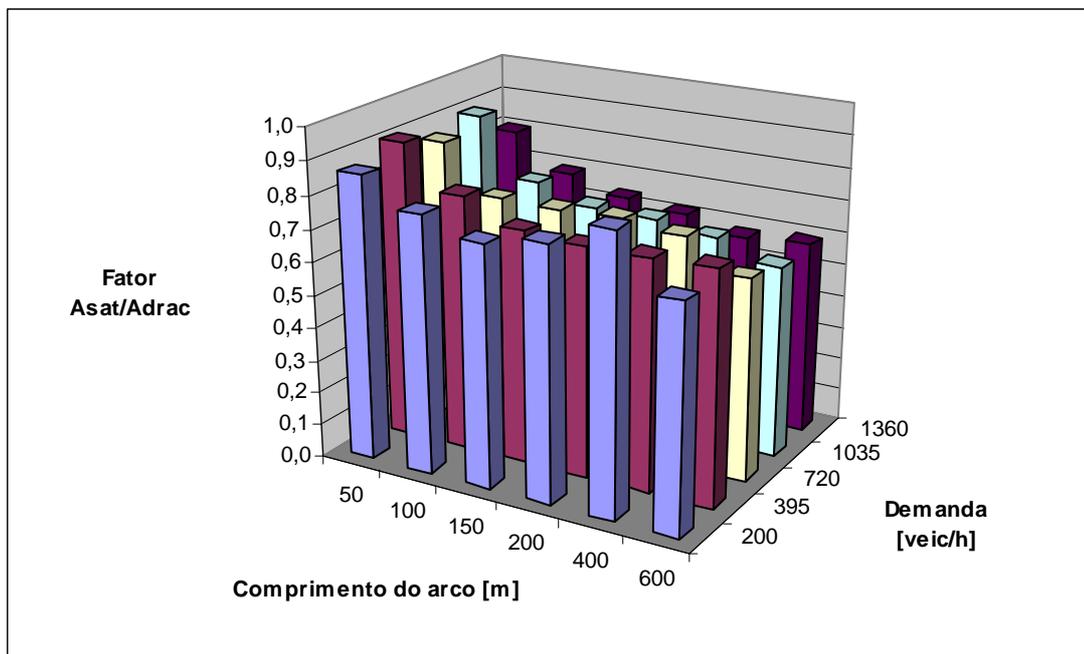
Figura 4.11 – Atrasos [s] estimados através do DRACULA no Teste 2B

Efetuando-se a razão entre o atraso estimado pelo SATURN e o atraso estimado pelo DRACULA, é possível identificar o “fator razão dos atrasos” (A_{SAT}/A_{DRAC}).

Quadro 4.9 - Razões entre os atrasos no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8
	100	0,8	0,8	0,7	0,7	0,7
	150	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6
	200	0,8	0,7	0,7	0,7	0,6
	400	0,8	0,7	0,7	0,6	0,6
	600	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6

A Figura 4.12 ilustra as razões entre os atrasos do SATURN e do DRACULA.

**Figura 4.12 - Razões entre atrasos (A_{SAT}/A_{DRAC}) no Teste 2B**

É possível identificar que os atrasos SATURN são sempre menores que os atrasos DRACULA. À medida que aumenta o volume de tráfego e o comprimento do arco, a diferença aumenta. Esse comportamento é natural uma vez que o atraso DRACULA agrega ao atraso junto à interseção viária, o tempo perdido ao longo do arco. O SATURN, por sua vez, estima somente os atrasos junto à interseção viária.

Tempos de cruzeiro

Conforme descrito na seção 3.5.3.1, o tempo de cruzeiro estimado pelo SATURN está associado à velocidade média de percurso através do arco. Já para o DRACULA, os tempos de cruzeiro referem-se ao deslocamento com velocidades superiores ao regime estacionário (acima de 0,5 m/s).

A seguir, são apresentados os tempos de cruzeiro estimados pelos modelos.

Quadro 4.10 – Tempos de cruzeiro [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	5,1	5,1	5,2	5,1	5,1
	100	10,3	10,3	10,3	10,3	10,3
	150	15,4	15,4	15,4	15,4	15,4
	200	20,6	20,6	20,6	20,6	20,6
	400	41,1	41,1	41,2	41,1	41,1
	600	61,7	61,7	61,7	61,7	61,7

Quadro 4.11 - Tempos de cruzeiro [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	3,2	3,0	2,7	2,8	2,5
	100	7,3	7,2	6,1	5,7	4,9
	150	12,3	11,9	11,5	10,3	9,2
	200	17,8	17,2	17,0	16,0	14,9
	400	39,0	37,7	38,4	37,3	36,1
	600	59,1	58,8	58,1	58,0	57,2

A Figura 4.13 e Figura 4.14 a ilustram, através de gráfico de barras, os tempos de cruzeiro estimados através dos dois modelos.

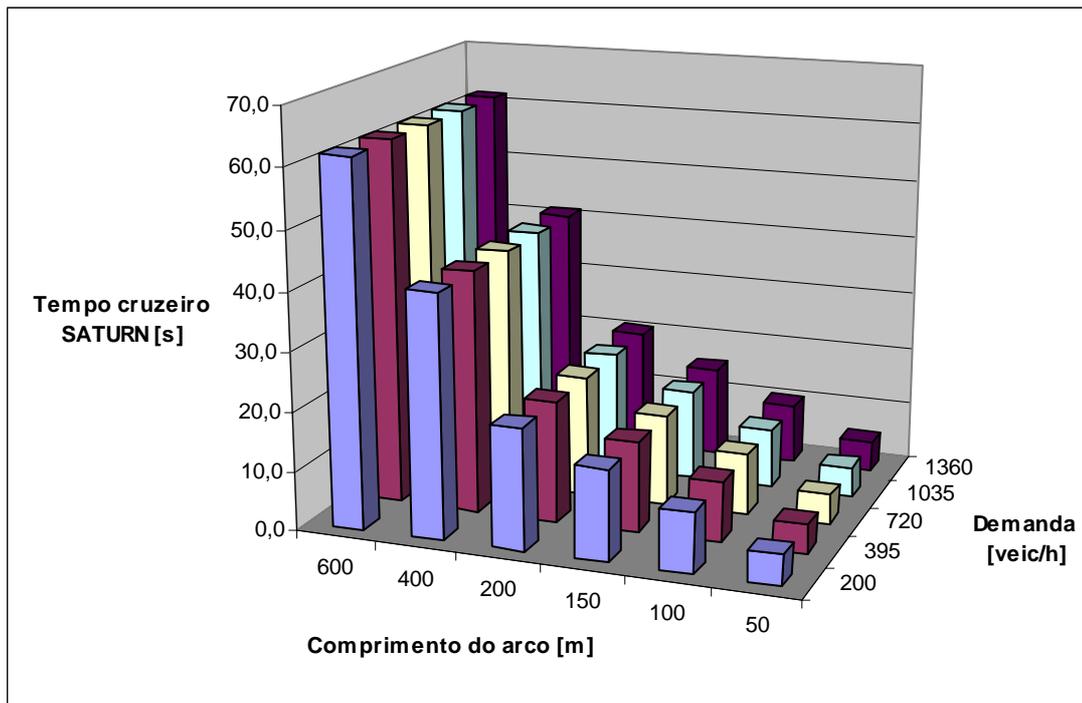


Figura 4.13 - Tempos de cruzeiro [s] estimados através do SATURN no teste 2B

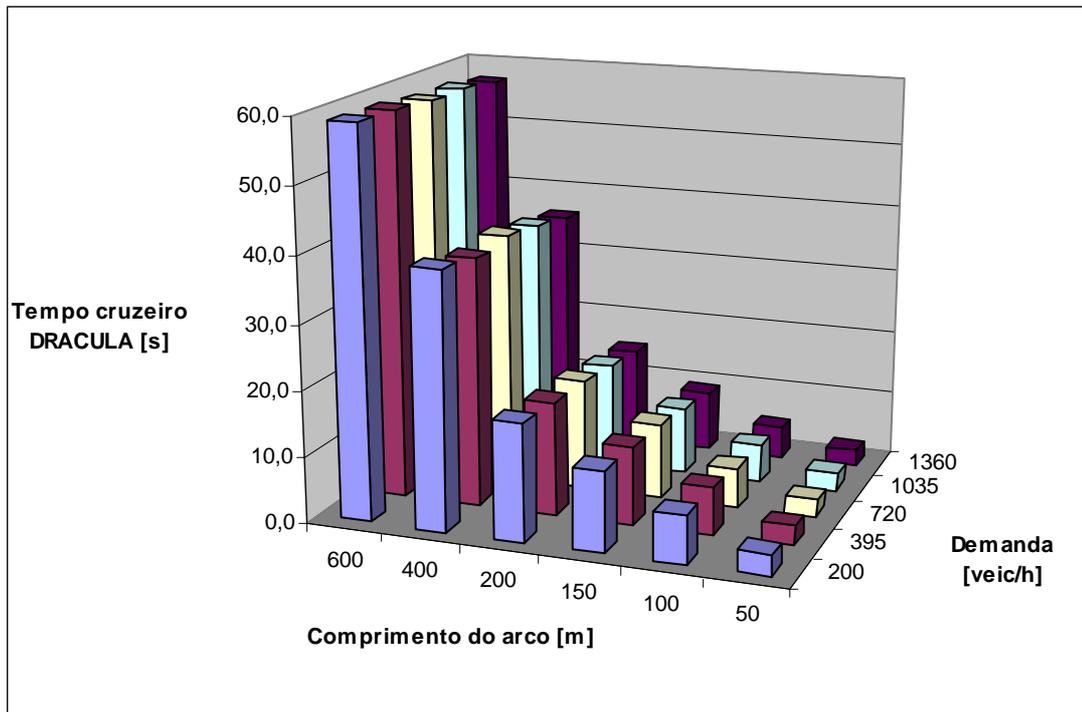


Figura 4.14 – Tempos de cruzeiro [s] estimados através do DRACULA no Teste 2B

Efetuando-se a razão entre os tempos de cruzeiro estimados pelo SATURN e DRACULA, é possível identificar o “*fator razão dos tempos de cruzeiro*” (TCsat/TCdrac).

Quadro 4.12 - Razões entre os tempos de cruzeiro no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	1,6	1,7	1,9	1,9	2,0
	100	1,4	1,4	1,7	1,8	2,1
	150	1,3	1,3	1,3	1,5	1,7
	200	1,2	1,2	1,2	1,3	1,4
	400	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
	600	1,0	1,0	1,1	1,1	1,1

A Figura 4.15 ilustra as razões entre os tempos de cruzeiro no SATURN e no DRACULA.

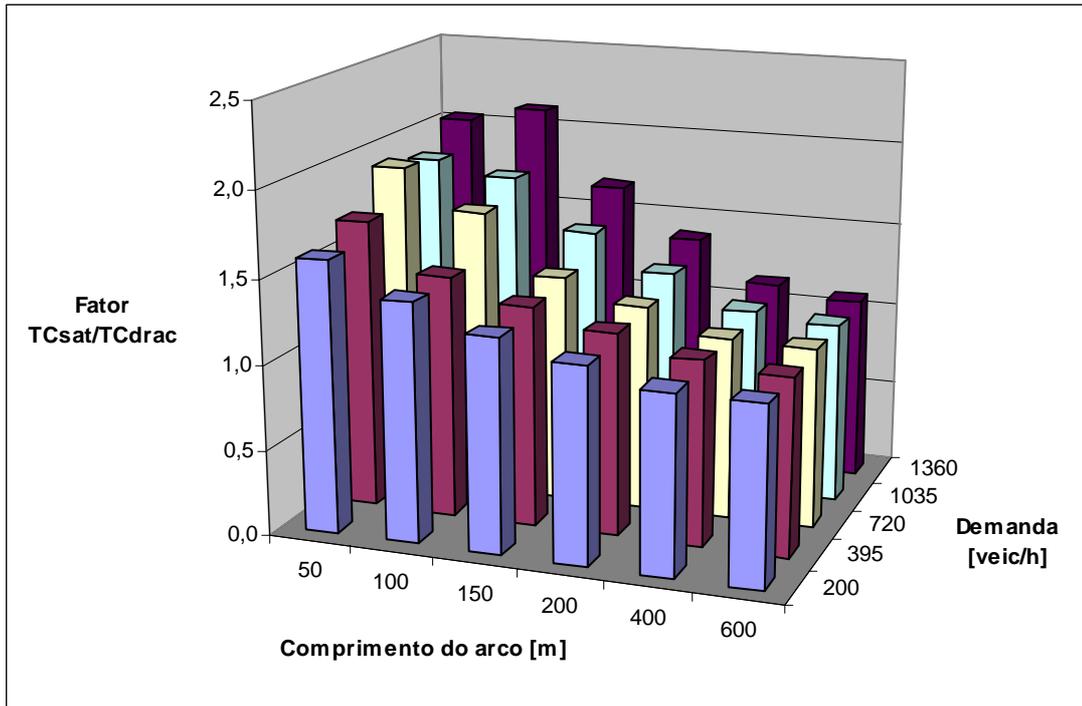


Figura 4.15 - Razões entre tempos de cruzeiro (TCsat/TCdrac) no Teste 2B

Tempos totais de viagem

Conforme descrito na seção 3.5.3.1, os tempos totais de viagem do SATURN e do DRACULA são conceitualmente equivalentes, expressando a mesma grandeza. A seguir, são apresentadas as estimativas dos tempos totais de viagem, no Teste 2B, através dos dois modelos.

Quadro 4.13 – Tempos totais de viagem [s] estimados pelo SATURN no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	17,0	17,7	19,0	20,6	22,7
	100	22,2	22,8	24,2	25,7	27,8
	150	27,3	28,0	29,3	30,9	32,9
	200	32,4	33,1	34,5	36,0	38,1
	400	53,0	53,7	55,0	56,6	58,7
	600	73,6	74,3	75,6	77,2	79,2

Quadro 4.14 - Tempos totais de viagem [s] estimados pelo DRACULA no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	16,9	16,8	18,8	20,0	24,5
	100	22,5	23,3	25,4	27,4	30,2
	150	28,5	29,5	30,9	33,5	36,5
	200	33,3	35,1	36,2	39,2	43,0
	400	53,2	55,7	58,1	61,4	66,1
	600	76,5	76,6	80,6	84,4	86,7

Efetuada-se a razão entre os tempos totais de viagem estimados pelo SATURN e o DRACULA, é possível identificar o “*fator razão dos tempos totais de viagem*” (TT_{SAT}/TT_{DRAC}).

Quadro 4.15 - Razões entre os tempos totais de viagem no Teste 2B

		Níveis de demanda [veic/h]				
		200	395	720	1035	1360
Comprimento do arco [m]	50	1,0	1,1	1,0	1,0	0,9
	100	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
	150	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9
	200	1,0	0,9	1,0	0,9	0,9
	400	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9
	600	1,0	1,0	0,9	0,9	0,9

4.3.2.3 Análise dos resultados

Nas condições testadas, é possível identificar que as estimativas de velocidade geral dos modelos foram bastante similares. A margem de diferença não superou 10 %, onde o SATURN sempre forneceu o maior valor.

Para os níveis mais altos de demanda (1360 veic/h), as velocidades estimadas pelo SATURN superaram os valores do DRACULA em 10%, para todos os comprimentos de rede.

Para os níveis de carregamento mais baixos (200 veic/h), as estimativas apresentaram magnitudes equivalentes.

Sobre os atrasos, é possível identificar que os valores são substancialmente diferentes, indicando conceitos distintos. Os atrasos no DRACULA superaram sempre os atrasos SATURN. À medida que aumenta o carregamento e o comprimento do arco, a margem de diferença aumenta. Conforme as discussões teóricas da Seção 3.5.3.1, o conceito de atraso DRACULA agrega, além do tempo parado na interseção, as reduções de velocidade ao longo do arco.

Sobre os tempos de cruzeiro, por outro lado, o SATURN superestima os valores em relação ao DRACULA. À medida que reduz o comprimento do arco e que aumenta a demanda, a margem de diferença aumenta.

As diferenças entre os tempos de cruzeiro e atrasos dos dois modelos se compensam, de modo que os tempos totais de viagem são similares. A margem de diferença não superou 10%. Nos níveis mais baixos de demanda, os valores estimados são mais aproximados, e as divergências são praticamente nulas. Nos cenários mais saturados, as estimativas de tempos totais do DRACULA superam as estimativas do SATURN em aproximadamente 10 %, para todos os comprimentos de arco.

Através dos Testes 2A e 2B é possível ilustrar que, em decorrência da fila vertical, o SATURN somente agrega atrasos em arcos com controle de tráfego a jusante. O DRACULA, por sua vez, contabiliza os atrasos dos veículos conforme a posição do veículo na rede, a cada passo da simulação.

4.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O presente capítulo apresentou uma série de testes de análises de sensibilidade desenvolvidos através do SATURN e do DRACULA. O objetivo é permitir uma melhor compreensão do efeito que os dados de entrada têm nos parâmetros de saída de cada modelo. Os testes permitiram quantificar a magnitude das diferenças entre as estimativas dos dois modelos.

Os dados de entrada avaliados envolvem a descrição da rede viária e a quantificação da demanda. Os parâmetros de saída correspondem a fluxos, atrasos, velocidades e tempos de viagem.

Os testes indicaram que os fluxos efetivos máximos no DRACULA variam conforme a velocidade desejada. Conforme as discussões teóricas na seção 3.5.3.2, em simulação microscópica, a estimativa de capacidade viária resulta do comportamento agregado da modelagem decorrente dos parâmetros comportamentais e dos dados de entrada.

Os modelos adotam diferentes conceitos para a velocidade do arco. O SATURN presume velocidade de cruzeiro, o DRACULA presume velocidade desejada. Assim, os modelos apresentaram comportamentos distintos no que se refere à estimativa de velocidades gerais, para uma mesma descrição de rede.

Para os cenários modelados sem controle de tráfego na interseção de jusante, a velocidade geral no DRACULA ficou reduzida em relação ao SATURN. Os resultados indicam que, à medida que reduz o comprimento e aumenta a demanda, as divergências se acentuam.

Para os cenários com controle de tráfego semafórico, as estimativas de tempos de viagem nos dois modelos foram bastante similares. Em geral, o DRACULA estimou tempos de viagem marginalmente superiores, onde as diferenças não excedem 10 %. As divergências se acentuam à medida que aumentam os níveis de saturação viária.

Como sugestão de modelagem quando do uso conjunto, propomos que a velocidade de cruzeiro (SATURN) seja adotada como base para determinação da velocidade desejada (DRACULA). Nessa proposta, a descrição de rede do SATURN é exportada diretamente para o DRACULA, e a velocidade desejada é definida como um produto entre a velocidade de cruzeiro e o fator de velocidades. Assim, o fator de velocidades a ser adotado no modelo DRACULA é ajustado com base na velocidade geral observada em campo, que se constitui no parâmetro referencial de calibração.

Porém, a sugestão é válida em situações restritas: não é recomendável em condições de supersaturação. À medida que aumenta o congestionamento, aumenta a dificuldade dos veículos atingirem a velocidade desejada. Assim, em condições de supersaturação, a velocidade de cruzeiro fica muito reduzida, apresentando-se em patamares que pouco representam a velocidade desejada. Além disso, nessas condições, as paradas dos veículos se tornam muito freqüentes, de modo que a velocidade de cruzeiro se torna um elemento de difícil percepção em campo.

Outra restrição a essa sugestão pressupõe que a rede modelada apresente homogeneidade nos padrões de tráfego, o que exige similaridade nas características operacionais da rede e nos níveis de demanda. Se houver arcos isolados com velocidades de

cruzeiro muito divergentes do padrão médio na rede, o fator de velocidades ajustado com base no comportamento agregado da rede poderá não ser apropriado para aqueles trechos.

A proposta de adotar a velocidade de cruzeiro como base para a determinação da velocidade desejada será avaliada no estudo de caso desenvolvido no Capítulo 5. Nesse capítulo, toda a metodologia de modelagem empregada é apresentada e avaliada.

CAPÍTULO 5 - ESTUDO DE CASO: MODELAGEM DA AV. INDEPENDÊNCIA

5.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

No presente capítulo, desenvolve-se um estudo de caso, onde os modelos SATURN e DRACULA reproduzem o mesmo cenário real. O capítulo detalha a seqüência de etapas de modelagem empregada, baseada na metodologia geral de aplicação de modelos descrita na seção 2.5.

O objetivo é estruturar uma metodologia de modelagem apropriada para o uso conjunto. As análises do estudo envolvem:

- propor medidas para aplicação do SATURN com o DRACULA;
- modelar o cenário real através do SATURN e do DRACULA;
- comparar os resultados dos modelos obtidos;
- avaliar a metodologia de modelagem empregada.

As análises destacam as particularidades dos modelos, onde são abordados os dados de entrada, as repercussões da fundamentação teórica na aplicação prática, e os parâmetros de saída.

A investigação gera subsídios para a aplicação conjunta dos modelos, em redes urbanas. As análises são fundamentadas na investigação teórica dos Capítulos 2 e 3, e nas análises de sensibilidade do Capítulo 4.

5.2 METODOLOGIA DE MODELAGEM ADOTADA

A metodologia de modelagem adotada pressupõe o uso conjunto, onde o modelo DRACULA é obtido a partir do SATURN.

Conforme descrito na seção 2.5, as etapas gerais de modelagem envolvem:

- (i) concepção do modelo;
- (ii) levantamento de dados;
- (iii) codificação de dados;
- (iv) calibração do modelo;
- (v) validação do modelo;
- (vi) análise dos resultados modelados.

A partir desta etapa, detalhamos a metodologia de modelagem adotada:

- (i) concepção do modelo;

Envolve a caracterização da área de estudo e as justificativas para a escolha da área efetivamente modelada.

- (ii) levantamento e apropriação de dados;

Apresenta os dados obtidos, as respectivas fontes de obtenção, técnicas de coleta e tabulação, e as medidas adotadas para apropriar a informação de campo à cada modelo.

- (iii) codificação de dados;

A metodologia de modelagem empregada avalia o uso da mesma descrição de rede por ambos os modelos. Assim, propõe-se que as velocidades desejadas nos arcos DRACULA sejam definidas pelo produto entre a velocidade de cruzamento nos arcos SATURN e o fator de velocidades dos veículos. Os fluxos no DRACULA são importados do SATURN.

- (iv) calibração do modelo;

Apresenta os dados e parâmetros calibrados para cada modelo, e os procedimentos adotados.

- (v) validação ou verificação do ajuste do modelo;

Apresenta os dados e os procedimentos para validação do modelo SATURN e verificação do ajuste do modelo DRACULA. A medida proposta é validar o SATURN e adotá-lo como referencial para verificação do ajuste do modelo DRACULA.

- (vi) análise dos resultados modelados.

A análise de resultados envolve a comparação dos resultados estimados pelos modelos com a realidade de campo, e entre cada modelo. Está intimamente associada à etapa de validação e verificação do ajuste precedente.

Nas próximas seções, a metodologia adotada na modelagem da avenida Independência (em Porto Alegre) é apresentada e as medidas propostas são avaliadas.

5.3 CONCEPÇÃO DOS MODELOS

O estudo avalia a aplicação do SATURN e do DRACULA para modelagem de redes urbanas. Assim, é importante que a área apresente tráfego interrompido por interseções viárias, que é uma característica típica de redes urbanas.

O SATURN e o DRACULA reproduzem, através de diferentes abordagens teóricas conforme descrito no Capítulo 2, diversas características do tráfego. Para ampliar a exploração dos modelos, é desejável que a área de estudo apresente essa diversidade de características na maior extensão possível. Assim, constituem exemplos de características cuja ocorrência na área de estudo é desejável: formação de filas em interseções, sincronismo semaforico, negociação de brechas em interseções prioritárias, compartilhamento de faixas nas conversões, etc.

O estudo compara a simulação microscópica com a abordagem mesoscópica. Para ressaltar as diferenças entre os modelos, é importante que o tráfego apresente características que permitam destacar o diferencial do tratamento microscópico. Assim, é desejável a ocorrência de características como expressiva diversidade de veículos na composição do tráfego, significativas interações transversais e longitudinais entre as entidades, e níveis de saturação moderados a elevados.

5.3.1.1 Área de estudo

O cenário modelado é composto por um trecho viário arterial, inserido na concentração urbana de Porto Alegre, com suas vias transversais adjacentes. Consiste na avenida Independência, trecho entre as ruas Barros Cassal e Ramiro Barcelos. A Figura 5.1 ilustra a rede modelada.

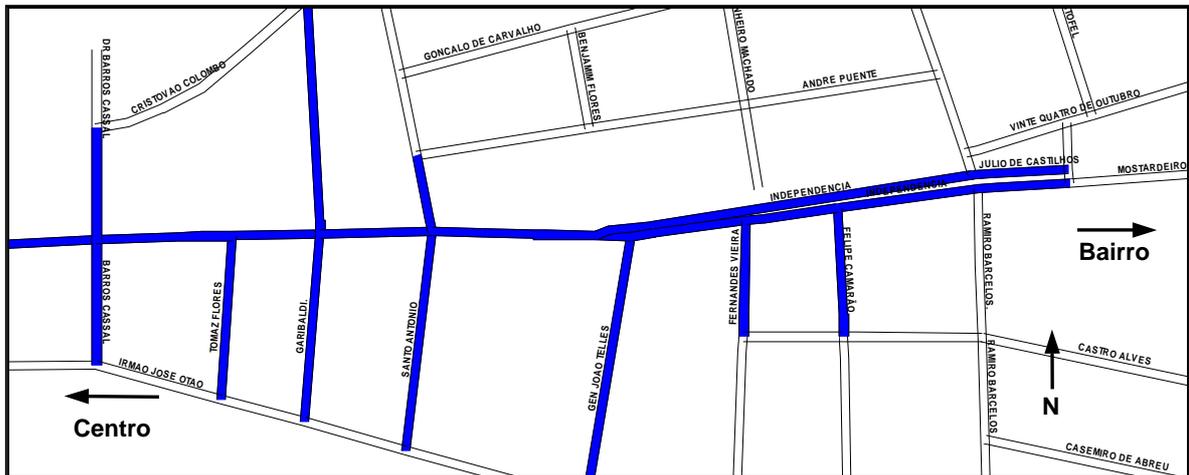


Figura 5.1 - Rede modelada

A av. Independência possui dois sentidos de circulação. No sentido principal O-L (Centro-Bairro), que apresenta o maior volume de tráfego, circulam automóveis particulares, veículos de carga e veículos de transporte público em tráfego misto. Nesse sentido de circulação, a via apresenta uma bifurcação, com separação através de canteiro central, à leste da interseção com a rua João Telles. Ao sul do canteiro central, o tráfego se preserva misto; ao norte, não circulam veículos de transporte público. No contra-fluxo do sentido principal, no sentido Bairro-Centro, existe uma faixa exclusiva delimitada através de sinalização no pavimento, reservada para os veículos de transporte público.

O Anexo 1 detalha a av. Independência, ilustrando as pistas de rolamento, os sentidos de circulação, o número de faixas nas vias e interseções, o controle de tráfego, as restrições de conversão, e os comprimentos dos segmentos viários.

A rede contém oito interseções: duas são prioritárias e seis são semaforizadas, sendo codificada através de 22 arcos e 15 nós internos. A rede é formada por arcos curtos e a influência das interseções no comportamento tráfego é expressiva. O comprimento longitudinal do trecho modelado totaliza 970 m, onde o comprimento médio dos arcos é 108 m. A programação semaforizada é implementada através de tempos fixos em sincronismo.

O horário modelado corresponde ao período de pico vespertino, entre 18:00h e 19:00h.

Na hora modelada, as vias operam com níveis de demanda próximos da capacidade viária. A formação de filas é evidente. O veículo predominante na composição do tráfego é o automóvel particular. No entanto, a presença de ônibus e microônibus é significativa. A demanda predominante é formada por usuários habituais, oriundos do Centro da cidade, retornando ao domicílio ao fim da tarde.

O trecho foi escolhido pelas seguintes razões:

- A presença abundante de interseções semaforizadas favorece a formação e, conseqüentemente, medição dos comprimentos e atrasos em fila. A medição das filas foi um parâmetro escolhido para avaliação das estimativas dos modelos e calibração do DRACULA. O comprimento médio e os atrasos em filas são estimados pelos modelos e o DRACULA reproduz explicitamente a formação e a dissipação de filas.
- O carregamento viário é elevado, porém as vias ainda operam aquém do limite de saturação. Assim, entre interseções adjacentes, o regime de cruzeiro é nítido e a fila se concentra próximo à interseção viária. Desse modo, a técnica de medição de velocidades de cruzeiro adotada no estudo (veículo teste) se faz adequada pois evita-se a dificuldade prática - comuns em trechos supersaturados com baixas velocidades - de distinção entre os regimes de cruzeiro e estacionário.
- Predominantemente, os usuários são habituais em viagens de retorno ao domicílio. A expectativa, conseqüentemente, é que o comportamento dos motoristas esteja bem amadurecido e estabilizado em decorrência da rotina diária. Assim, espera-se um padrão de comportamento bem nítido que subsidie a obtenção de modelos consistentes.

5.3.1.2 *Pontos de geração de tráfego*

Em cada arco de entrada ou saída da rede foi modelado um ponto de origem ou destino de viagens, respectivamente. Como predomina o tráfego de passagem, não foram modelados pontos de geração de tráfego internos à rede.

Pela estrutura longitudinal da rede, só existe uma rota possível entre cada par origem-destino. Assim, a fase de alocação de tráfego do SATURN não efetua escolha de rotas.

5.4 LEVANTAMENTO E APROPRIAÇÃO DE DADOS

A etapa de levantamento de dados envolve a coleta de dados em campo e a obtenção de informações. A apropriação de dados consiste no processamento das informações coletadas, de modo a expressá-las nas dimensões próprias de cada modelo. Os dados subsidiam a construção do modelo, através da codificação, calibração e validação dos modelos.

As informações de campo envolvem basicamente três conjuntos de informações: descrição da rede, quantificação da demanda, e caracterização do tráfego. Os dados de caracterização do tráfego decorrem conjuntamente das características da rede e da demanda. Essas informações permitem caracterizar quantitativamente o tráfego estudado.

Conforme a seção 3.2.2.1, os dados de entrada do SATURN envolvem a descrição de rede e a quantificação da demanda. O DRACULA, além destas informações, exige um conjunto de parâmetros comportamentais e características dos veículos (seção 3.3.2.2).

Os parâmetros comportamentais, as características dos veículos, e as velocidades desejadas do DRACULA foram definidos na fase de calibração do modelo (descrita adiante na seção 5.7.1), a partir dos dados de caracterização do tráfego.

5.4.1 Levantamento prévio de dados

O levantamento prévio de dados envolveu a obtenção de informações em escritório que já estavam cadastradas em já fontes existentes. Os dados obtidos referem-se à descrição de rede e consistem em:

- estrutura geométrica da rede;
- programação semafórica.

A estrutura geométrica da rede, envolvendo os comprimentos dos arcos e as coordenadas dos nós, foi obtida através de Sistemas de Informações Geográficas. A programação semafórica vigente na hora modelada foi obtida diretamente das planilhas dos controladores, cadastradas junto ao órgão competente do poder público.

5.4.2 Coleta de dados em campo

A etapa de coleta de dados em campo envolveu a obtenção de informações no ambiente viário, durante o período modelado. Foram levantadas informações sobre a descrição de rede, a quantificação da demanda, e a caracterização do tráfego.

Descrição de rede

Sobre a descrição de rede, foram coletadas as seguintes informações:

- número efetivo de faixas de circulação e compartilhamento das conversões nas faixas das aproximações viárias, que foram caracterizados através de observações visuais em campo;
- velocidades de cruzeiro nos arcos (SATURN).

Quantificação da demanda

A demanda de tráfego vigente na rede foi quantificada através de:

- fluxos nos arcos ou conversões;
- composição de tráfego.

Caracterização do tráfego

O tráfego circulando na rede foi caracterizado através dos seguintes elementos:

- velocidades gerais nos arcos e na av. Independência;
- filas nas interseções, medidas através de atrasos (em “veic × h”) e comprimento médio (em “veic” e em “m”).

A coleta de dados se desenvolveu num único dia, onde todos os elementos foram coletados simultaneamente ao longo da hora modelada. Assim objetiva-se eliminar os efeitos da variabilidade dia-a-dia preservando maior homogeneidade e consistência nas informações levantadas. Nas seções que seguem, apresenta-se as técnicas de coleta de dados adotadas, os procedimentos de apropriação dos dados para a modelagem, e os valores obtidos.

5.4.2.1 Velocidade de cruzeiro e velocidade geral

As velocidades de cruzeiro e geral atendem a diferentes finalidades. A velocidade de cruzeiro nos arcos consiste num dado de entrada de descrição da rede SATURN. A velocidade geral consiste num dado de caracterização do tráfego, utilizado para subsidiar as etapas de calibração e validação de ambos os modelos.

A medição das velocidades nos arcos desenvolveu-se através da técnica de veículo teste, conforme o método descrito em LASTRAN (1997). Foram utilizados três veículos percorrendo, ciclicamente, o trecho viário observado. Foram amostradas em média 14 observações por arco. O Quadro 5.1 apresenta as velocidades médias observadas em campo para os trechos da av. Independência.

Quadro 5.1 - Velocidades observadas na av. Independência

Trecho viário	Velocidade geral	Velocidade de cruzeiro
Início da rede - Barros Cassal	14,9	20,0
Barros Cassal - Garibaldi	17,5	22,6
Garibaldi - St° Antonio	17,2	17,2
St° Antônio - João Telles	27,0	27,0
João Telles - Ramiro Barcelos (N)	27,5	29,4
João Telles - Ramiro Barcelos (S)	34,9	36,6

A velocidade geral média coletada na rede equivale a 23,8 km/h. A velocidade média de cruzeiro ficou em 26,1 km/h. No ramo direito da av. Independência, ao sul do canteiro central, a velocidade média geral foi de 19,0 km/h e a velocidade de cruzeiro foi de 24,8 km/h.

5.4.2.2 Demanda de tráfego

A demanda de tráfego do SATURN, na forma de matriz O-D, foi definida a partir de contagens volumétricas nas conversões e arcos, conforme descrito adiante na seção 5.6.1.

A demanda de tráfego, em essência, constitui um dado de entrada do SATURN. Porém, as estimativas de fluxos efetivos através dos arcos são fortemente influenciadas por outras características da modelagem como a definição de capacidades viárias. Assim, as contagens volumétricas na rede assumem dupla função: constituem um dado de entrada do SATURN, mas também constituem um parâmetro de caracterização do tráfego, subsidiando as etapas de calibração e validação do modelo.

Os fluxos na rede foram identificados a partir de contagens volumétricas manuais nas conversões, com 13 pesquisadores distribuídos em todas as interseções da rede. A coleta, desenvolvida no período de pico vespertino (entre 18:00h e 19:00h), foi desagregada em intervalos de 15 min de modo a evidenciar a variabilidade da demanda na hora-do-dia. A partir das contagens, o fluxo médio de entrada totaliza 5040 veic/h.

A variabilidade da demanda entre os intervalos de tempo apresentou-se pouco significativa: a variação em relação à média é 3,1%. Assim, para fins de modelagem, assumiu-se taxa de demanda constante ao longo do período modelado. A Figura 5.2 ilustra a variabilidade da demanda na hora modelada.

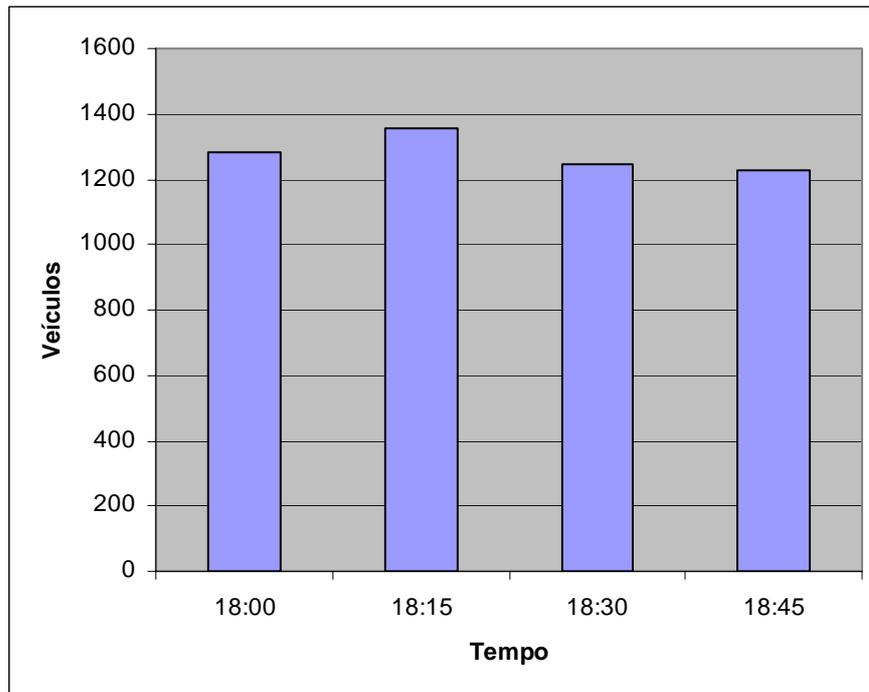


Figura 5.2 – Variabilidade da demanda total na hora modelada (em veic a cada 15 min)

A composição do tráfego foi identificada através das filmagens. Foram contabilizados 95,5% de automóveis particulares; 1,1 % de veículos de grande porte (ônibus e caminhões pesados); e 3,3 % de veículos de médio porte (caminhões leves e lotações). O Quadro 5.2 indica as proporções e os comprimentos dos diferentes tipos de veículos observados em campo.

Quadro 5.2 - Dimensões dos veículos observadas

Veículo	Proporção	Comprimento (m)
Automóvel	95,5%	4,0
Caminhão grande	0,2%	12,6
Caminhão pequeno	0,5%	7,0
Ônibus	0,9%	12,6
Lotação	2,8%	7,0
Média	100,0%	4,2

Os modelos SATURN e DRACULA quantificam o fluxo de tráfego através de diferentes unidades. O SATURN expressa o fluxo agregadamente em UVP/h. O DRACULA quantifica o fluxo em veículos/h e especifica o percentual de cada tipo de veículo no fluxo total.

Havendo exportação de fluxos do SATURN para o DRACULA, é importante reverter o fluxo em UVP para fluxo em veículos. Essa conversão pode ser desenvolvida através de um fator específico do DRACULA.

A demanda de tráfego do SATURN foi dividida em dois grupos ou classes: veículos na matriz origem-destino (automóveis e caminhões); e veículos nas linhas de transporte público. Essa distinção se faz oportuna porque as linhas de transporte público constituem uma parcela particular da demanda, a qual pode ser codificada em registros independentes da matriz de viagens. Cada um dos grupos definidos possui seu comprimento médio particular. O Quadro 5.3 apresenta os comprimentos médios de cada grupo, calculados a partir das proporções na composição do tráfego dispostas no Quadro 5.2.

Quadro 5.3 – Dimensões médias dos grupos de veículos

Grupo de veículos	Proporção	Comprimento médio [m]
Automóvel e caminhão (matriz)	96,3%	4,04
Ônibus e Lotações (transporte público)	3,7%	8,4
Média	100,0%	4,2

Para cada classe de veículo, o SATURN permite especificar um fator de equivalência representando a proporção em UVP equivalente a um veículo. Para fins desse estudo, o comprimento da UVP e o fator de equivalência dos veículos de transporte público foram definidos com base nos comprimentos dos veículos adicionados aos respectivos afastamentos observados entre veículos adjacentes em fila.

O afastamento médio observado em torno dos automóveis em fila foi 1,2 m. Assim, o comprimento calculado da UVP equivale 5,3 m, e foi especificado ao SATURN através do parâmetro ALEX. O afastamento em torno dos ônibus e lotações foi 1,7 m. O parâmetro BUSPCU, que converte o fluxo dos veículos de transporte público para fluxo em UVP, foi calculado em 1,88.

No DRACULA, os fluxos quantificados em UVP/h importados do SATURN são revertidos para veículos/h através do parâmetro PCU, que assumiu o valor 0,993. Adicionalmente, foram informadas as porcentagens na composição do tráfego e os comprimentos de cada tipo de veículo, conforme o quadro Quadro 5.2.

As linhas de transporte público e suas respectivas frequências foram obtidas junto ao poder público. O fluxo efetivamente modelado foi corrigido conforme os valores contabilizados nas filmagens.

5.4.2.3 *Medição de filas*

As filas medidas não constituem dados de entrada nos modelos. Constituem em informações de caracterização do tráfego, e servem como referencial para subsidiar as etapas de validação e calibração dos modelos, desenvolvidas nas seções 5.6 e 5.7.

As filas foram quantificadas através do atraso médio por veículo (em segundos), da fila média (em veículos), e do comprimento médio da fila (em m). Essas médias são relativas ao tempo integral do período de estudo.

A medição das filas efetuou-se a partir de filmagem ininterrupta ao longo da hora modelada, em três pontos da av. Independência, no sentido Centro-Bairro. Foram filmadas e quantificadas as filas estocadas na av. Independência, junto às interseções com a rua Santo Antônio (Fila SA); e das duas aproximações junto à rua Ramiro Barcelos, ao norte e ao sul do canteiro central (Fila RN e Fila RS, respectivamente). A Figura 5.1 permite localizar os pontos onde houve filmagem de filas. A Figura 5.3 apresenta a filmagem da interseção viária junto à rua Ramiro Barcelos. O Anexo 3 ilustra a filmagem da fila formada junto à rua Santo Antônio.



Figura 5.3 – Filmagem da interseção junto à rua Ramiro Barcelos (Fila RS e Fila RN)

As filas foram filmadas e medidas ao longo de todo o período modelado (1 hora). Como o tempo de ciclo na rede é de 100 seg, foram observadas e quantificadas 36 formações de filas formadas durante os tempos de vermelho semaforico, junto a cada uma das três interseções semaforizadas (totalizando 108 formações). Assim, para cada formação de fila, foi traçado um diagrama quantificando a retenção de veículos, ao longo do tempo.

A Figura 5.4 ilustra o diagrama que caracteriza a formação e a dissipação da fila durante um ciclo semaforico, na interseção com a rua Ramiro Barcelos.

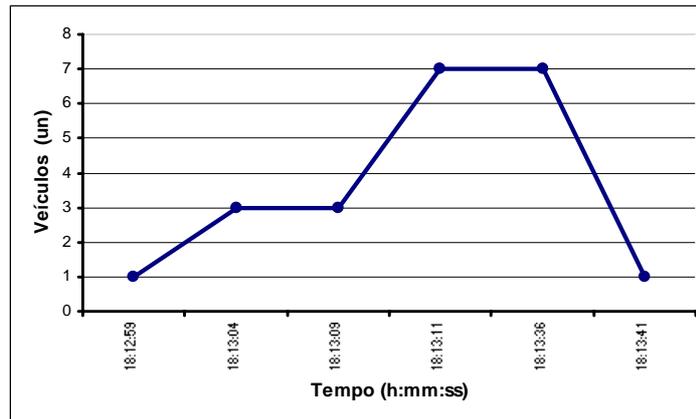


Figura 5.4 - Diagrama de fila junto à rua Ramiro Barcelos

O intervalo de tempo após a dissipação de uma fila e antes do início da formação da fila do vermelho semafórico subsequente contribui, no cálculo da fila média, com o valor nulo. Esse fato possibilita, eventualmente, a obtenção de filas médias inferiores a 1 veículo.

Houve ciclos em que se formaram filas tão extensas que, imediatamente após a abertura da luz verde no semáforo, enquanto ocorria a partida de veículos na dianteira da fila, simultaneamente chegavam veículos na parte traseira da mesma. Nesses casos, foi necessário identificar os perfis isolados de chegada e saída de veículos. Assim, a fila de veículos efetivamente parados foi determinada a partir das diferenças entre os perfis de chegada e saída, conforme a Figura 5.5.

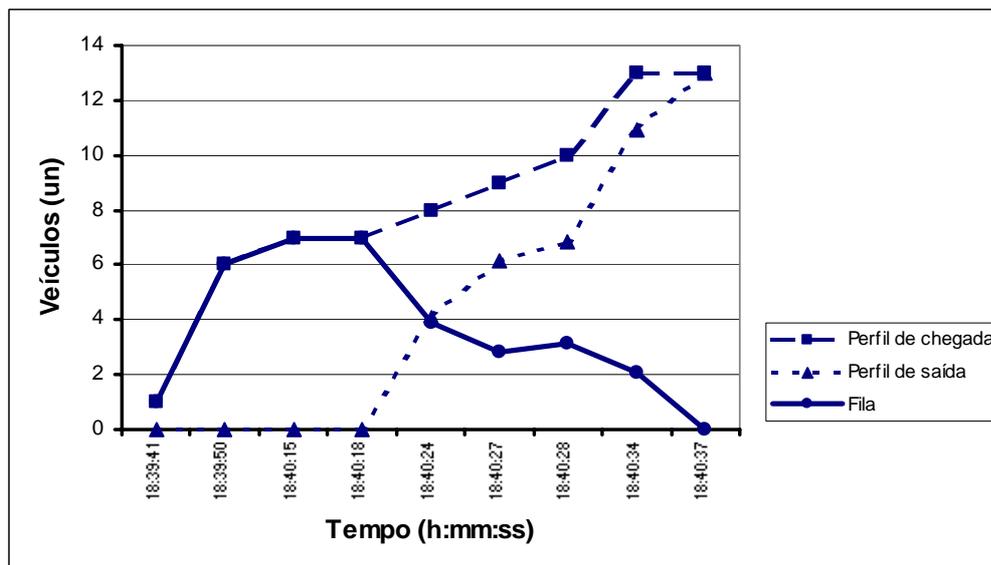


Figura 5.5 - Diagrama de fila extensa (com chegada e saída de veículos simultâneas)

Os diagramas de fila subsidiaram o cálculo do comportamento médio e agregado das filas, em cada aproximação viária, durante o período avaliado. O tempo de veículos retidos em fila (veic \times h) equivale à área sob o perfil, onde o somatório das áreas agrega o atraso total

(veic × h) nas filas formadas no período. A fila máxima observada num ciclo (veículos) equivale à maior ordenada de cada perfil. A fila média (em veículos) corresponde à ordenada do retângulo cuja área, onde a abscissa representa o tempo, equivale ao somatório das áreas parciais dos perfis. O atraso médio por veículo (segundos) corresponde ao quociente entre o tempo de veículos retidos em filas (veic x h), e o fluxo médio no período.

Os valores agregados obtidos, nas três interseções pesquisadas, são apresentados no Quadro 5.4, no Quadro 5.5 e no Quadro 5.6. Em se tratando de valores médios no tempo, naturalmente, não há necessidade que os valores obtidos sejam inteiros.

Quadro 5.4 – Medição da fila junto à rua Santo Antônio (Fila SA)

Horário (hh:mm:ss)	Tempo Total (veic × h)	Fila Máxima (veic)	Fila Média (veic)	Atraso médio (s)
6:00-6:15	0:29:31	12	1,97	6
6:15-6:30	0:29:57	12	2,00	7
6:30-6:45	0:27:41	11	1,85	6
6:45-7:00	0:23:34	10	1,57	6
6:00-7:00	1:50:43	11,74	1,85	6

Quadro 5.5 – Medição da fila junto à rua Ramiro Barcelos, pista sul (Fila RS)

Horário (hh:mm:ss)	Tempo Total (veic × h)	Fila Máxima (veic)	Fila Média (veic)	Atraso médio (s)
6:00-6:15	1:02:09	18	4,1	21
6:15-6:30	0:59:00	19	3,9	19
6:30-6:45	1:04:31	20	4,3	26
6:45-7:00	1:10:21	21	4,7	23
6:00-7:00	4:16:02	19,56	4,3	22

Quadro 5.6 – Medição da fila junto à rua Ramiro Barcelos, pista norte (Fila RN)

Horário (hh:mm:ss)	Tempo Total (veic × h)	Fila Máxima (veic)	Fila Média (veic)	Atraso médio (s)
6:00-6:15	0:19:28	4	1,5	15
6:15-6:30	0:23:41	5	1,6	24
6:30-6:45	0:32:28	7	2,2	21
6:45-7:00	0:20:00	4	1,3	16
6:00-7:00	1:35:37	4,92	1,6	19

5.5 CODIFICAÇÃO DOS MODELOS

A etapa de codificação envolveu a construção dos arquivos de dados de entrada, em acordo à formatação exigida pelos modelos.

Codificação do modelo SATURN

Os dados de entrada codificados através do SATURN envolvem a descrição de rede e a quantificação da demanda.

Os dados de descrição da rede, obtidos conforme descrito na seção 5.4, consistem em: coordenadas dos nós, controle de tráfego nas interseções (programação semafórica e relações de prioridade), comprimento dos arcos, e velocidades de cruzeiro.

O SATURN exige, ainda, os fluxos de saturação das conversões. No presente estudo, os fluxos de saturação foram definidos a partir do Quadro 5.7. O referencial foi elaborado por Técnicos da EPTC – Empresa Pública de Transportes e Circulação, com base em referenciais da bibliografia, e na experiência prática de modelagem através do TRANSYT, em Porto Alegre.

Quadro 5.7 - Fluxos de saturação adotados no SATURN

		RAIO DE GIRO DA CONVERSÃO								
		Linha reta			20 m			10 m		
		Aclive de 4%	Plano	Declive de 4%	Aclive de 4%	Plano	Declive de 4%	Aclive de 4%	Plano	Declive de 4%
Número de faixas	1 Fx	1670	1900	2130	1550	1760	1980	1450	1650	1840
	2 Fx	3340	3800	4250	2580	2930	3280	2410	2740	3060

O referencial apresentado no Quadro 5.7 foi aplicado e obteve desempenho satisfatório em vários estudos de modelagem através do SATURN, em Porto Alegre (Cybis *et. al*, 1999; Freitas *et. al*, 2001; Araújo e Cybis, 2002).

A demanda de tráfego no SATURN é informada através de contagens volumétricas. A matriz O-D de viagens de automóvel, foi definida na etapa de calibração do modelo, conforme descrito na seção 5.6.1.1.

A Figura 5.6 ilustra a av. Independência modelada através do SATURN. A imagem foi obtida do módulo gráfico do modelo. O Anexo 2 apresenta a rede codificada com a identificação dos nós.

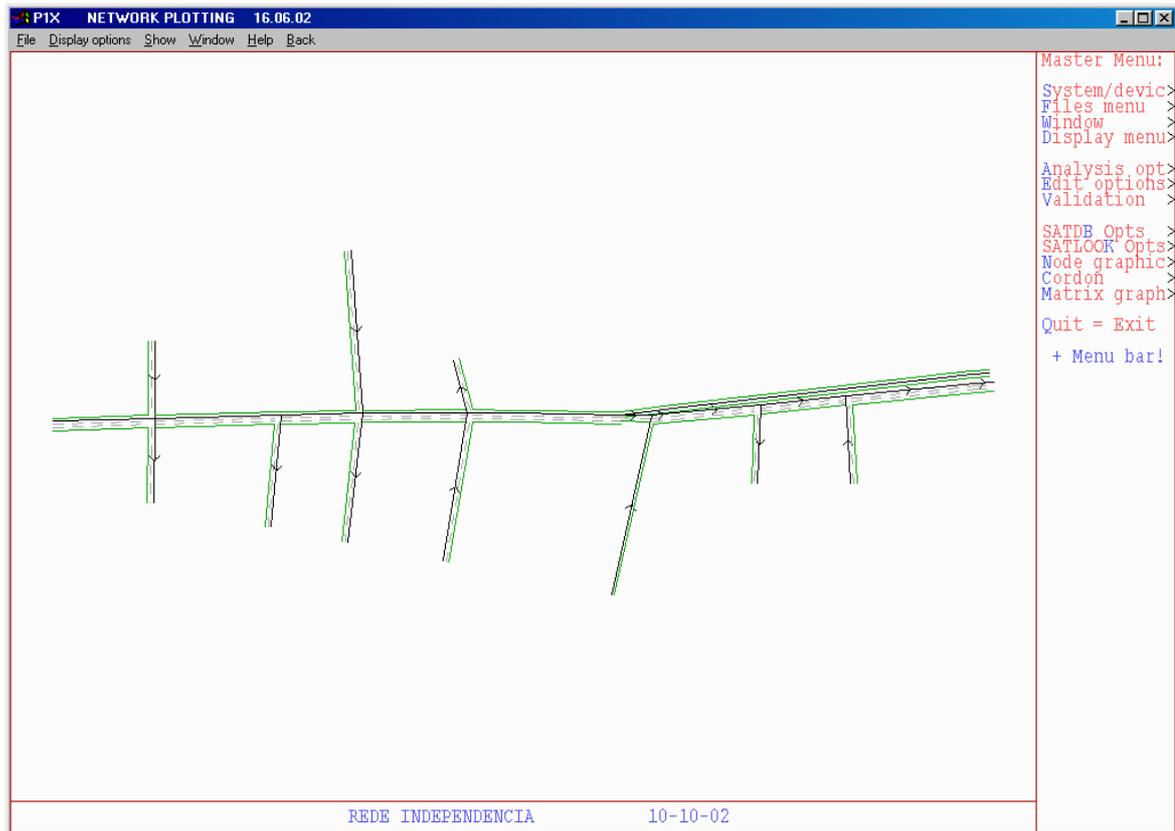


Figura 5.6 - Representação da rede modelada através do SATURN

Codificação do modelo DRACULA

Na metodologia de modelagem empregada, conforme proposto na seção 5.2, o arquivo de descrição da rede no DRACULA foi importada diretamente do SATURN. Assim, as velocidades desejadas nos arcos do DRACULA são definidas pelo produto entre a velocidade de cruzeiro do SATURN e o fator de velocidades, cujo valor foi definido na etapa de calibração do modelo DRACULA, conforme descrito na seção 5.7.

A demanda de tráfego também foi importada do SATURN. Na seção 5.4.2.2, são descritas as medidas empregadas para apropriar a descrição de demanda do SATURN para o DRACULA, em acordo à discussão teórica da seção 3.5.1.2.

A Figura 5.7 ilustra a rede da av. Independência modelada através do DRACULA. A imagem foi capturada do módulo de animação do modelo

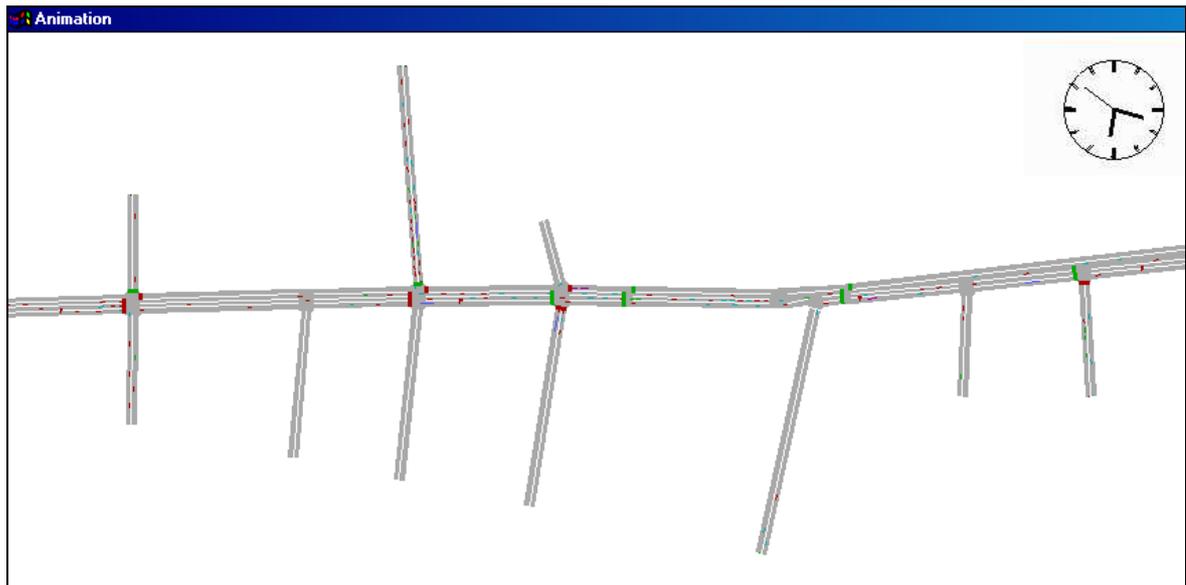


Figura 5.7 - Representação da rede modelada através do DRACULA

5.6 CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DO SATURN

As etapas de calibração e validação de modelos macroscópicos ou mesoscópicos são significativamente mais simplificadas que de modelos microscópicos. Abaixo, apresentamos os elementos avaliados e as análises nas etapas de calibração ou ajuste e validação do modelo SATURN.

5.6.1 Medidas de calibração e ajuste do SATURN

Para o SATURN, as medidas de calibração do modelo foram conduzidas de modo a reproduzir os fluxos observados em campo.

A matriz de viagens foi calibrada através do módulo de maximização de entropia do SATURN, ME2. Os dados e parâmetros ajustados consistem em: fluxos de saturação, e GAP de interseções prioritárias.

A fase de calibração e ajuste do modelo se deu através de um processo iterativo. O ajuste de um parâmetro específico implicou sempre na repetição da calibração da matriz e na avaliação do novo modelo obtido. Abaixo, detalhamos as medidas de calibração ou ajuste de cada parâmetro.

5.6.1.1 Demanda de tráfego

A matriz origem-destino foi calibrada a partir do módulo de atualização de matrizes do SATURN ME2 (Matzoros *et al.*, 1987). O ME2 estima, a partir de uma matriz preliminar, a matriz mais provável associada a um conjunto de contagens volumétricas.

Geração de viagens - matriz preliminar

A matriz preliminar foi obtida a partir das contagens volumétricas localizadas somente nos arcos de entrada e saída da rede. Os volumes de entrada na rede definiram o total de viagens produzidas em cada ponto; os volumes de saída definiram os totais de viagens atraídas por cada ponto de geração de viagens.

Distribuição de viagens - matriz preliminar

A distribuição de viagens foi efetuada por fator uniforme (Ortúzar e Willumsen, 1994). As viagens produzidas em cada ponto de geração tráfego foram distribuídas ao demais, proporcionalmente ao potencial de atração de cada ponto. Assumiu-se que o potencial de atração de viagens de cada ponto geração é equivalente ao total de viagens efetivamente atraído por aquele ponto.

Calibração da matriz de viagens

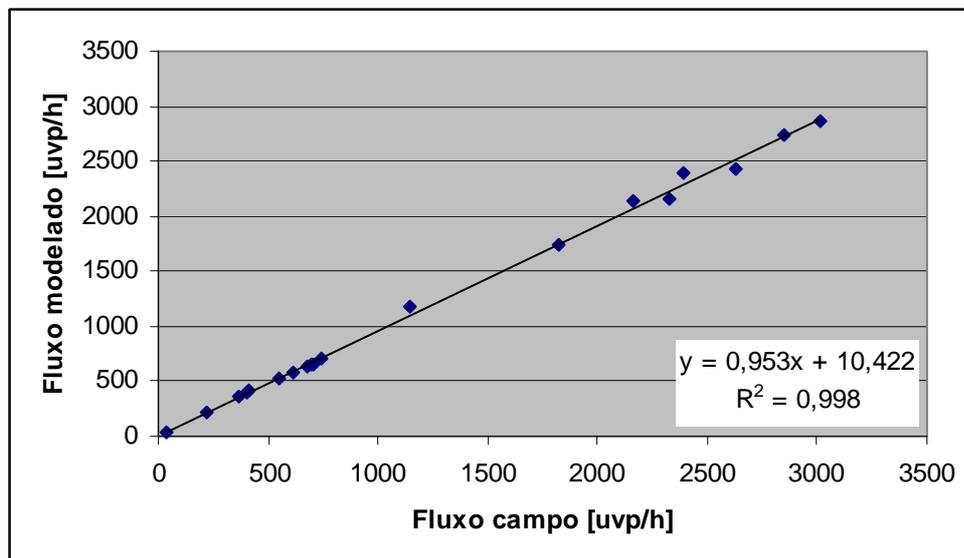
Para calibração da matriz através do ME2, foi contemplado, inicialmente, todo o conjunto de contagens volumétricas. Foram descartadas duas observações que divergiram significativamente da reta de ajuste entre fluxos estimados e fluxos observados.

O Quadro 5.8 compara os fluxos observados em campo com os fluxos correspondentes estimados pelo SATURN, após a calibração definitiva da matriz de viagens. O erro médio percentual equivale a 3,7%; o erro máximo equivale a 7,4%.

Quadro 5.8 - Fluxos observados x fluxos modelados pelo SATURN

Arco	Nó início	Nó fim	Fluxo campo [UVP/h]	Fluxo SATURN [UVP/h]	Diferença [%]
1	704	1306	3010	2857	5,1
2	1312	1315	2160	2138	1,0
3	1350	1334	697	654	6,2
4	1328	1332	2848	2744	3,7
5	1311	1312	1826	1732	5,2
6	812	702	2632	2429	7,7
7	822	812	2329	2156	7,4
8	6	812	674	639	5,2
9	812	807	370	367	0,8
10	702	810	33	34	-3,0
11	9	704	1145	1178	-2,9
12	704	811	740	716	3,2
13	815	1306	408	412	-1,0
14	1306	15	549	525	4,4
15	816	1333	220	220	0,0
16	1311	1360	616	578	6,2
17	1361	1312	406	406	0,0
18	1332	1350	706	654	7,4
19	702	704	2394	2395	0,0
				Média	3,7

A Figura 5.8 compara, através da reta de ajuste, os fluxos estimados e os fluxos observados em campo, nos arcos e conversões.

**Figura 5.8 – Fluxos observados x fluxos modelados pelo SATURN**

A matriz obtida a partir da atualização da matriz totalizou 4766 UVP/h (4733 veic/h). A demanda de transporte público equivale a 216 veic/h (406 UVP/h).

5.6.1.2 Ajuste do GAP

A variável GAP tem grande impacto na estimação de atrasos e capacidades viárias de interseções prioritárias.

O valor *default* da variável GAP, definido em 5,0 segundos, gerou super-saturação da interseção prioritária. Desse modo, os fluxos modelados foram subestimados em relação à observação de campo.

Van Vliet e Hall (2000) considera o valor *default* da variável GAP superestimado. Assim, o parâmetro foi reduzido, por tentativas, para 2,5 segundos. Essa medida, eliminou a supersaturação da interseção prioritária, em acordo à realidade observada em campo.

5.6.2 Validação do modelo SATURN

A validação do modelo SATURN efetuou-se através de comparação entre as estimativas do modelo e as medições de campo. Os parâmetros avaliados foram as filas médias [UVP], e os atrasos em fila [s] e a velocidade geral na av. Independência. Esses parâmetros foram escolhidos porque avaliam o comportamento do tráfego nas interseções e nos arcos.

A velocidade média observada em campo na av. Independência equivale a 19 km/h. O SATURN estimou a valor de 18 km/h.

No Quadro 5.9 as filas médias estimadas pelo modelo SATURN ajustado são comparados com as observações de campo.

Quadro 5.9 - Comparação das filas médias [UVP]

Interseção	Campo	SATURN
Ramiro Barcelos (N)	1,6	1,5
Ramiro Barcelos (S)	4,3	4,7
Sto. Antônio	1,9	2,6

A Figura 5.9 ilustra e compara as fila médias estimadas pelo SATURN com as observações de campo correspondentes.

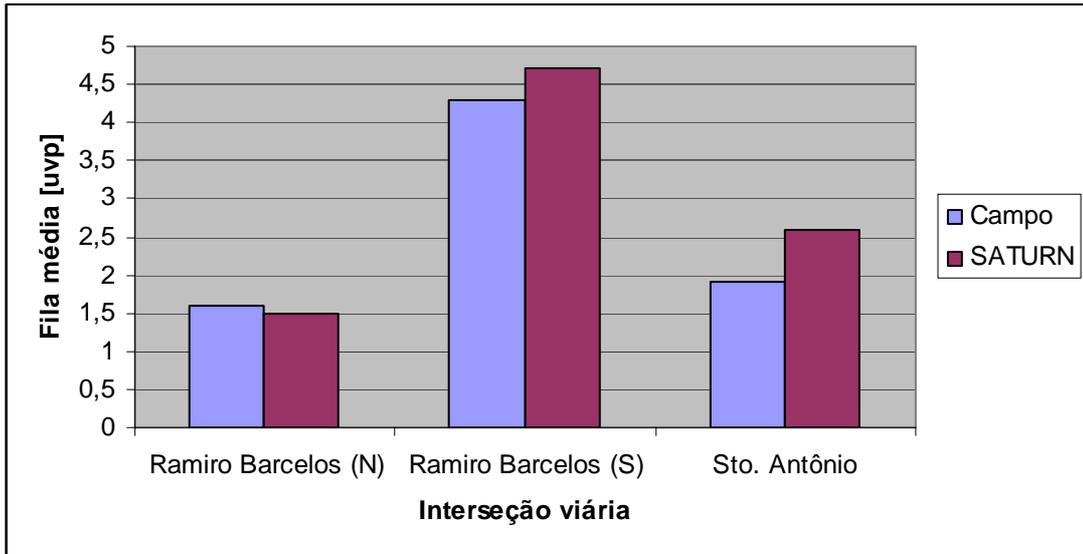


Figura 5.9 – Filas médias: estimativa do SATURN e medição de campo

O Quadro 5.10 compara os atrasos médios estimados nas filas com as observações de campo correspondentes.

Quadro 5.10 - Comparação dos atrasos em fila[s]

Interseção	Campo	SATURN
Ramiro Barcelos (N)	8,5	8,5
Ramiro Barcelos (S)	7,3	7,9
Sto. Antônio	2,3	3,3

A Figura 5.10 ilustra e compara os atrasos estimados pelo SATURN com as observações de campo correspondentes.

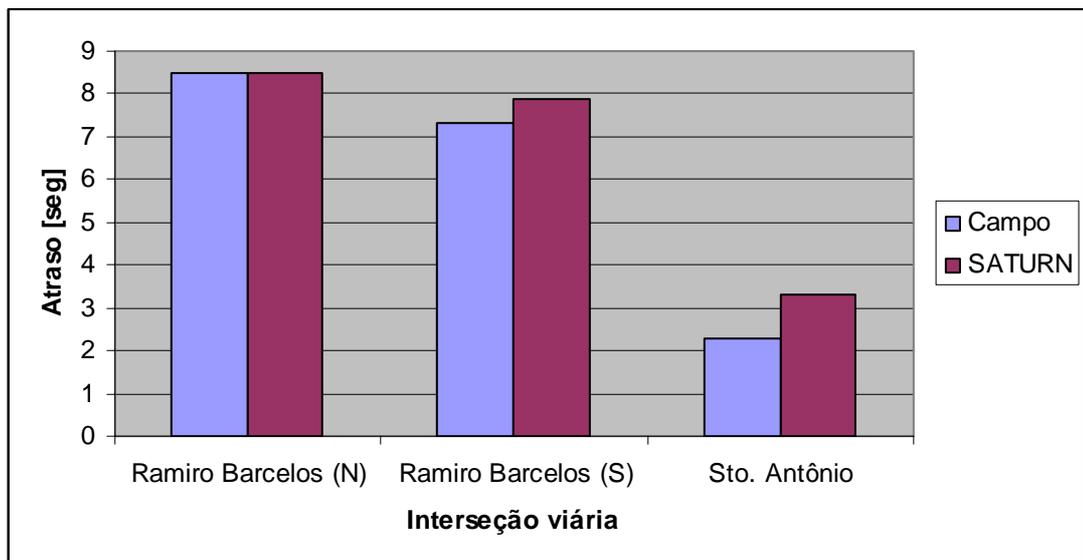


Figura 5.10 – Atrasos em fila: estimativa do SATURN e medição de campo

A partir dos parâmetros avaliados, o desempenho da modelagem SATURN foi considerado satisfatório.

5.7 CALIBRAÇÃO DO DRACULA

Modelos de simulação microscópicos apropriam aspectos do tráfego não avaliados pelos modelos macro/mesoscópicos. As interações longitudinais e transversais entre veículos, e a variabilidade aleatória das variáveis são alguns exemplos. Conseqüentemente, a modelagem exige o levantamento de informações adicionais.

O DRACULA exige, além dos dados de descrição de rede e quantificação de demanda, a definição de diversos parâmetros comportamentais e características dos veículos. O manual do modelo (Liu, 2000) apresenta os parâmetros passíveis de calibração, associados a diferentes elementos da modelagem.

As características dos veículos envolvem os seguintes parâmetros: o valor médio, o coeficiente de variação, e os limites superior e inferior da distribuição normal truncada de 9 características, para 6 tipos de veículos. O modelo de *lane-changing* envolve 2 parâmetros, o modelo de *car-following* oferece 3, e o modelo de aceitação de brechas, 9 parâmetros. Ainda, o DRACULA oferece 2 parâmetros para ajustar tempo e distância de reação dos veículos ao controle de tráfego na interseção, e 2 parâmetros para definir a variabilidade aleatória geral na rede.

A calibração de simuladores microscópicos comportamentais como o DRACULA é, conforme discutido na seção 2.5.3, uma tarefa complexa, que consome grande tempo de modelagem.

Dados e parâmetros questionados

Dentre a diversidade de elementos passíveis de calibração acima apresentada, com base na fundamentação teórica e na revisão bibliográfica, foram selecionados os seguintes elementos para ajuste e calibração:

- características dos veículos;

Dentre as características dos veículos apresentadas na seção 3.3.2.2, propõe-se ajustar quatro características: os comprimentos dos veículos, as acelerações, as desacelerações normais, e os fatores de velocidade. A variabilidade *default* dos parâmetros do modelo não foi questionada.

- modelo de *lane-changing*;

Os ajustes do modelo de *lane-changing* objetivam ajustar o fenômeno de troca de faixas. O parâmetro questionado (F1_OVERTAKE) atua no estímulo de mudança de faixas para aumento de velocidade, conforme Liu (2000).

- modelo de *gap-acceptance*.

Os ajustes no modelo de aceitação de brechas objetivam reproduzir o comportamento observado na interseção prioritária. A medida proposta é ajustar o decréscimo gradual das brechas em função do tempo de espera do veículo (parâmetros GAP, GAP_MIN, GAP_TSTART e GAP_TEND).

Os parâmetros do modelo de *car-following* não foram questionados por recomendações de Liu (1994), pois já estão ajustados para redes urbanas.

Referenciais de comparação

Nas análises de calibração, ajuste e verificação do ajuste do modelo DRACULA, adotou-se os seguintes referenciais para orientar a definição de valor dos parâmetros questionados:

- dados de caracterização do tráfego;
Compara-se as estimativas do modelo com os fluxos nos arcos, velocidades gerais, e comprimentos de fila observados em campo.
- observação visual;
A animação gráfica do DRACULA permite avaliar o comportamento do tráfego, em comparação com as filmagens e a realidade observada em campo.
- referenciais da bibliografia;
Presume assegurar a consistência dos parâmetros ajustados. Assim, os parâmetros ajustados são comparados com referenciais da bibliografia.
- estimativa do SATURN.
Em consequência da validação satisfatória do modelo SATURN, os parâmetros estimados são adotados como valores referenciais para verificação do ajuste do DRACULA.

Fases da calibração

A etapa de calibração do DRACULA compreende seis fases onde os dados ou parâmetros ajustados e os elementos de análise são distintos.

O processo é baseado em tentativa e erro. O objetivo da seqüência de fases proposta, além da identificação de uma solução satisfatória, é possibilitar um aprendizado sobre o

modelo. Uma boa compreensão sobre o significado das variáveis é essencial para evitar esforço desnecessário. As etapas consistem:

- (i) ajuste da descrição de rede;
- (ii) avaliação do modelo microscópico *default*;
- (iii) ajuste preliminar de parâmetros;
- (iv) análises de sensibilidade por regressões lineares múltiplas;
- (v) ajuste definitivo baseado nas observações de campo;
- (vi) verificação do ajuste do modelo.

Fase (i) – *ajuste da descrição de rede*. O objetivo desta fase é avaliar se a descrição de rede apropriada para o modelo SATURN, é adequada para a modelagem DRACULA.

Fase (ii) - *avaliação do modelo microscópico default*. Nesta fase, o desempenho do modelo obtido a partir dos parâmetros *defaults* é comparado com a realidade observada. Nessa fase, são re-avaliadas as variáveis propostas para ajuste.

Fase (iii) - *ajuste preliminar de parâmetros*. A partir do diagnóstico do modelo *default* (realizado em ii), são propostos os valores preliminares das variáveis a ajustar. Nesta fase, o desempenho da animação, os referenciais da bibliografia e as estimativas do modelo SATURN validado orientam a definição dos valores preliminares dos parâmetros.

Fase (iv) – *análises de sensibilidade através de regressões lineares múltiplas*. Nesta fase, definem-se as variáveis para ajuste quantitativo. Esse ajuste é orientado pela comparação das estimativas do modelo com as observações de campo. As variáveis escolhidas devem ter uma forte correlação com as observações de campo adotadas como referencial. Através de regressões lineares múltiplas, avalia-se o impacto dessas variáveis nos parâmetros de saída. O objetivo das análises de regressões, também, é identificar valores que servem como ponto de partida para o ajuste por tentativa e erro.

Fase (v) - *ajuste de parâmetros baseado nas observações de campo*. A partir do ponto de partida indicado em (iv), e dos valores preliminares definidos em (iii), ajusta-se marginalmente, por tentativa e erro, os parâmetros em ajuste quantitativo.

Na fase (vi) – *verificação do ajuste do modelo*, avalia-se o ajuste do modelo calibrado. Além das observações de campo, as estimativas do modelo SATURN previamente validado são adotadas como referencial.

Caso o desempenho do modelo não seja considerado satisfatório, o processo é repetido, iterativamente, até que se identifique uma solução satisfatória.

A disposição numérica das fases não indica, necessariamente, uma relação rigorosamente seqüencial de atividades. Trata-se, na realidade, de uma estruturação didática que apenas preserva uma tendência de seqüência temporal. Na prática, especialmente as fases (i) a (iii), se desenvolveram num processo iterativo.

5.7.1 Calibração do DRACULA: aplicação do processo

Nesta seção, apresentamos o detalhamento das fases e as principais conclusões obtidas ao longo do processo.

5.7.1.1 Ajuste da descrição de rede

A rede do DRACULA foi obtida a partir do SATURN. É importante re-avaliar os dados de entrada pois, apesar dos modelos facultarem a mesma descrição de rede, as estruturas de modelagem são distintas.

Sobre a descrição da rede, algumas hipóteses adequadas para o modelo SATURN exigiram adaptações no modelo microscópico. O fato decorre dos modelos estimarem as capacidades viárias a partir de informações substancialmente diferentes, conforme a seção 3.5.

Como exemplo, citamos a descrição da interseção prioritária junto à rua João Telles. Em campo, os veículos efetuam essa conversão hora em uma faixa, hora em duas faixas – situação inviável de ser explicitamente codificada. O fluxo de saturação no SATURN relativamente a uma faixa apenas, foi suficiente para que o modelo reproduzisse os fluxos observados.

O DRACULA, porém, exigiu duas faixas para modelar a conversão. Assim, aumentou-se a capacidade no modelo, de modo que o fluxo através do arco reproduzisse o valor observado em campo.

5.7.1.2 Avaliação do modelo default

A primeira etapa de calibração avaliou o desempenho do modelo obtido a partir dos valores *default* dos parâmetros do DRACULA. No Quadro 5.11, os resultados estimados são comparados com os valores medidos em campo.

Quadro 5.11 - Resultados com parâmetros *defaults* do DRACULA

Parâmetro	Medição de campo	DRACULA <i>default</i>
Velocidade av. Independência	19,0 km/h	10,6 km/h
Fluxo efetivo de veículos na rede	4733 veículos	4495 veículos
Tempo de esvaziamento da rede	63 min	77,0 min

O fluxo efetivo na rede estimado pelo DRACULA indica o total de veículos que saíram da rede no período modelado.

O tempo de esvaziamento indica o tempo necessário para que todos os veículos gerados durante o período de simulação desenvolvam a sua jornada através da rede. O valor de 63 minutos equivale a 60 minutos (período de modelagem) adicionados a 3 minutos necessários para percorrer a rota de maior comprimento da rede. Essa rota equivale à av. Independência inteira, e o valor de 3 minutos foi medido na pesquisa de velocidades através de veículo-teste, conforme a seção 5.4.2.1.

Para os valores *default* dos parâmetros do DRACULA, é possível observar que tanto a velocidade geral quanto o fluxo efetivo foram subestimados. A animação também revelou a formação de filas crescentes nas interseções mais carregadas, o que não se verifica na realidade. Assim, é possível concluir que os valores *default* dos parâmetros do DRACULA geraram um comportamento dos motoristas menos agressivo do que aquele verificado em campo.

As análises vêm em acordo às conclusões do Teste 1, desenvolvido na seção 4.2, onde foi possível identificar que o modelo *default* do DRACULA gerou, naquelas condições, capacidades viárias não superiores a 1400 veic/h, para velocidades no arco até 60 km/h. O Quadro 5.7, que apresenta fluxos de saturação adequados para a realidade de Porto Alegre (Cybis *et al.*, 1999), sugere valores substancialmente superiores àquelas estimativas.

O valor reduzido da velocidade geral vêm em acordo à análise teórica da seção 3.5, que alerta sobre os diferentes conceitos de velocidade nos arcos. As velocidades de cruzamento geraram valores reduzidos de velocidade geral.

5.7.1.3 Ajustes preliminares de calibração

Os ajustes preliminares compreendem identificação de valores dos parâmetros que melhorem a consistência do modelo, em comparação aos valores *default*.

Observações visuais na área modelada permitem concluir que os motoristas costumam trocar de faixa frequentemente de modo a contornar veículos mais lentos. Assim, o modelo de *lane-changing default* foi ajustado de modo a permitir mais ultrapassagens. A medida foi

obtida através da redução do fator F1_OVERTAKE de 2,0 para 1,25. O valor foi definido através da comparação da animação gráfica com a observação visual de campo.

Aumentar a facilidade de mudanças de faixa no modelo permite que veículos mais lentos sejam ultrapassados com mais facilidade. Desse modo, paralelamente, a medida também aumentou os fluxos efetivos nos arcos.

Para a interseção prioritária junto à rua João Telles, o valor do GAP foi ajustado (reduzido) com base no comprimento da fila visualizado na animação, em comparação com a observação de campo.

Para redes urbanas, espera-se valores de velocidades desejadas não superiores às velocidade limites da via. Conseqüentemente, na av. Independência, a expectativa é que as velocidades desejadas situem-se entre 40 e 60 km/h, conforme os limites impostos pela sinalização vertical. Como a velocidade de cruzeiro média na rede equivale a 26,1 km/h, espera-se que o fator de velocidades do modelo calibrado encontre-se na faixa entre 1,53 e 2,30.

Para aumentar a agressividade e a rapidez dos motoristas modelados no DRACULA, propõe-se ajustar três conjuntos de elementos: aumentar as velocidades desejadas, ajustar as taxas de aceleração (e desaceleração) e aumentar a facilidade de trocas de faixa no modelo de *lane-changing*.

Esses três elementos foram escolhidos porque, em conjunto, atuam sobre toda a progressão do tráfego. O fator de ultrapassagem é fortemente relacionado com o movimento transversal na pista. As acelerações e o fator de velocidade governam o movimento longitudinal. Paralelamente, esse conjunto de fatores exerce grande influência em todas as dinâmicas veiculares (aceleração, desaceleração, cruzeiro). Assim, espera-se que esses parâmetros afetem a formação e dissipação das filas e a progressão do tráfego, exercendo grande impacto nas estimativas de velocidades geral, de cruzeiro, e nos fluxos efetivos nos arcos.

5.7.1.4 *Análise de sensibilidade*

As análises de sensibilidade permitem avaliar o impacto de alguns parâmetros de entrada nos parâmetros de saída do DRACULA. Os parâmetros avaliados nas regressões, denominados parâmetros em calibração quantitativa, devem apresentar uma forte correlação com os valores referenciais, que correspondem às observações de campo.

Os parâmetros escolhidos compreendem três grupos de variáveis: acelerações e desacelerações normais, fator de velocidade (Fv), e fator de ultrapassagem (F1). A razão entre as taxas de aceleração e desaceleração do modelo *default* foi preservada. Desse modo, a variável efetivamente avaliada foi um fator multiplicador agregado (Fac) atuando sobre ambas as taxas.

Os parâmetros de saída são: a velocidade na av. Independência (Vel), e as filas nas interseções (Santo Antônio – Fila SA, Ramiro Barcelos pista Sul – Fila RS, e Ramiro Barcelos pista Norte – Fila RN).

Os atrasos nas interseções medidos em campo não foram adotados como referencial de validação, pois não correspondem ao conceito de atraso no DRACULA.

As análises de sensibilidade por regressões lineares compreendem as seguintes etapas:

- (i) seleção dos parâmetros para calibração (variáveis independentes);
- (ii) definição da faixa de variação dos valores das variáveis independentes;
- (iii) modelagem com o DRACULA, dos cenários correspondentes aos diferentes valores de variáveis independentes;
- (iv) análise dos modelos de regressão linear;
- (v) identificação da solução ótima nos modelos de regressão linear.

A solução ótima minimiza o erro entre os valores das variáveis dependentes e a observação de campo correspondente. Os valores servem como ponto de partida para a calibração quantitativa por tentativa e erro.

Foram escolhidos 5 níveis de variação para cada uma das 3 variáveis independentes, o que totaliza 125 cenários (combinações de valores das variáveis independentes). Para considerar os efeitos da variação aleatória, para cada cenário foram executadas três simulações com sementes estocásticas distintas. Assim, dispôs-se de 375 modelos diferentes.

A faixa de variação das variáveis independentes foi delimitada superiormente e inferiormente por valores que, supostamente, indicam a expectativa de consistência da variável. O incremento entre cada valor de uma mesma variável foi constante. O Quadro 5.12 indica os valores avaliados.

Quadro 5.12 - Valores das variáveis independentes

Nível	Fator sobre acelerações	Fator de velocidade	F1_OVERTAKE
1	0,50	1,10	2,00
2	0,80	1,60	1,75
3	1,20	2,10	1,50
4	1,50	2,60	1,25
5	1,80	3,10	1,00

A partir dos relatórios de saída do modelo, foram identificadas as estimativas de filas da três interseções (Fila SA, Fila RN e Fila RS), e a estimativa de velocidades no ramo direito da av. Independência (Vel).

Justificativa do uso das regressões

As análises de regressões lineares múltiplas foram escolhidas, nas análises de sensibilidade, pelos seguintes motivos:

- Permitem avaliar o efeito simultâneo de mais de uma variável.
- Permitem identificar, numericamente, uma solução que minimiza o erro entre valores estimados e observados. Assim, oferece um ponto de partida para a calibração por tentativa e erro.
- A forma funcional rígida evita a modelagem de ruídos associados à modelagem estocástica. É difícil captar as relações entre as variáveis sem uma ferramenta de ajuste.

Limitações do uso das regressões

As análises de regressões lineares múltiplas apresentaram as seguintes limitações:

- O processo consome tempo extenso.
- A forma funcional rígida só avalia correlações lineares. É possível que exista outro tipo de relações entre as variáveis

Regressões lineares preliminares

Nas regressões lineares preliminares, foram avaliadas as seguintes variáveis propostas para ajuste: Fac, Fv e F1. A seguir, apresentamos os principais resultados e discussões sobre as regressões lineares preliminares.

Quadro 5.13 - Correlações preliminares entre as variáveis

	Fac	Fv	F1	Vel.	Fila SA	Fila RS	Fila RN
Fac	1,00						
Fv	0,00	1,00					
F1	0,00	0,00	1,00				
Vel.	0,66	0,60	-0,04	1,00			
Fila SA	-0,60	-0,33	0,13	-0,82	1,00		
Fila RS	0,27	-0,92	-0,07	-0,40	0,15	1,00	
Fila RN	-0,24	-0,83	-0,02	-0,78	0,52	0,77	1,00

O Quadro 5.13 permite concluir que:

- A variável multiplicador da aceleração (Fac) apresenta correlações lineares moderadas com a velocidade na av. Independência (Vel) e o comprimento de fila da Santo Antônio (Fila SA): 0,66 e -0,60, respectivamente. À medida que aumenta o Fac, aumenta a Vel e diminui a Fila SA. Não há evidência que existe correlação linear entre Fac e os comprimentos das filas da Ramiro (Fila RS e RN).
- As correlações entre o fator de velocidades (Fv) e os comprimentos de filas na Ramiro são elevadas (-0,91 e -0,83). Existe uma tendência de redução no comprimento dessas filas à medida que aumenta o Fv. Não existe correlação linear significativa entre o Fv e a Fila da Santo Antônio. A correlação entre o Fv e a Vel é moderada, onde a Vel cresce com o Fv.
- O Fator F1 não apresenta correlação significativa com quaisquer variáveis.

A partir dos resultados das regressões realizadas, é possível concluir que não existe evidência que a variável dependente Fila SA seja linearmente explicada pelas variáveis Fv e F1. Da mesma forma, não existe evidência que a variável independente F1 seja linearmente explicada por quaisquer das variáveis dependentes.

É importante considerar que o arco onde se desenvolve a Fila SA apresentou algumas características particulares em comparação aos demais arcos da rede, de modo que o seu comportamento pode ser considerado atípico:

- o arco possui a menor velocidade de cruzeiro na rede, destoando da média;
- o arco é curto e apresenta elevados níveis de tráfego onde nas filmagens, muitas vezes, o arco atinge a capacidade de estocagem;
- o arco apresenta plano semaforico de três tempos, o que dificultou a medição de filas;
- a fila com pior desempenho na etapa de validação do SATURN corresponde a esse arco;

Assim, optou-se por realizar novos modelos de regressões onde a variável F1 não é considerada como variável independente e a variável Fila SA é excluída das variáveis dependentes. Esses novos modelos constituem as regressões lineares definitivas e envolveram somente as variáveis efetivamente escolhidas para ajuste.

Regressões lineares definitivas

Os valores das variáveis independentes associados à solução ótima no modelo de regressões definitivas constituem o ponto de partida para a calibração dos parâmetros por tentativa e erro.

O novo conjunto de dados avaliado preserva as variáveis independentes Fac e Fv, conforme apresentado no Quadro 5.14. As duplas de variáveis geraram 25 combinações possíveis. Para cada combinação, foram gerados três modelos com sementes aleatórias diferentes totalizando 75 observações.

Quadro 5.14– Valores das variáveis nas regressões definitivas

Nível	Fac	Fv
1	0,50	1,10
2	0,80	1,60
3	1,20	2,10
4	1,50	2,60
5	1,80	3,10

As variáveis dependentes que permanecem nas análises são os comprimentos de filas das duas aproximações da Ramiro Barcelos (Fila RN e Fila RS), e a estimativa de velocidades no ramo direito da av. Independência (Vel). A seguir, apresentamos os principais resultados e discussões sobre os novos modelos obtidos por regressões lineares múltiplas.

Quadro 5.15 - Correlações entre as variáveis

	Fac	Fv	Vel.	Fila RS	Fila RN
Fac	1,00				
Fv	0,00	1,00			
Vel.	0,65	0,54	1,00		
Fila RS	0,31	-0,91	-0,33	1,00	
Fila RN	-0,24	-0,83	-0,77	0,75	1,00

O Quadro 5.15 permite concluir que:

- O multiplicador da aceleração (Fac) apresenta correlação linear moderada (0,65) com a velocidade na av. Independência (Vel). Não há evidência que existe correlação linear entre a variável Fac e os comprimentos das filas da Ramiro (Fila RS e RN).

- As correlações entre o fator de velocidades (Fv) e os comprimentos de filas na Ramiro são elevadas (-0,92 e -0,83). Existe uma tendência de redução no comprimento da fila à medida que aumenta o valor de Fv. A correlação entre as variáveis Fv e Vel é moderada (0,54), onde a variável Vel apresenta tendência de crescimento em função de aumentos em Fv.

A seguir, são apresentados os modelos gerados a partir das regressões lineares definitivas.

Modelo de velocidade:

$$Vel = -3,62 + 11,54 \times Fac + 6,36 \times Fv$$

Quadro 5.16 - Resultados da regressão: modelo da velocidade

Estatísticas gerais	Estatística t
R-Quadrado: 0,72	Constante: -1,76
Observações: 75	Fac: 10,51
Estatística F: 93,57	Fv: 8,76

O modelo apresentou R^2 satisfatório e foi aprovado no teste da estatística F ($F > 3$, com nível de significância 5%). Os testes da estatística t ($|estatística t| > 1,96$) das duas variáveis independentes foram aprovados.

Modelo do comprimento da Fila Ramiro Norte:

$$FilaRN = 8,35 + 1,33 \times Fac - 2,58 \times Fv$$

Quadro 5.17 - Resultados da regressão: modelo da Fila RN

Estatísticas gerais	Estatística t
R-Quadrado: 0,93	Constante: 32,54
Observações: 75	Fac: 9,67
Estatística F: 452,09	Fv: -28,47

O modelo apresentou R^2 satisfatório e foi aprovado no teste da estatística F ($F > 3$, com nível de significância 5%). Os testes da estatística t ($|estatística t| > 1,96$) das duas variáveis independentes foram aprovados.

Modelo do comprimento da Fila Ramiro Sul:

$$FilaRS = 7,96 - 0,89 \times Fac - 2,07 \times Fv$$

Quadro 5.18 - Resultados da regressão: modelo da fila RS

<i>Estatísticas gerais</i>	<i>Estatística t</i>
R-Quadrado: 0,74	Constante: 18,99
Observações: 75	Fac: -3,99
Estatística F: 105,16	Fv: -13,94

O modelo apresentou R^2 satisfatório e foi aprovado no teste da estatística F ($F > 3$, com nível de significância 5%). Os testes da estatística t ($|estatística t| > 1,96$) das duas variáveis independentes foram aprovados.

Identificação da solução ótima nos modelos de regressões

Os modelos de regressões lineares permitem estimar o conjunto de combinações de valores das variáveis independentes que satisfazem as condições de contorno, onde os valores a serem reproduzidos correspondem às medições de campo. Em se tratando de duas variáveis independentes e três variáveis dependentes, não há garantia de que a solução ótima para uma variável seja a mesma para as demais. Assim, o problema foi tratado como um caso de minimização de erros.

As variáveis dependentes são os comprimentos de filas (Filas RN e Fila RS) e a velocidade no ramo direito da av. Independência (Vel). Considerou-se a variável Vel prioritária sobre as demais. Isso porque a velocidade reflete uma grandeza agregada de grande extensão da rede, que caracteriza o comportamento do tráfego tanto das interseções como dos arcos. Já as variáveis que caracterizam o comprimento das filas, refletem o comportamento localizado de duas interseções, apenas. No Quadro 5.19, são apresentados os valores referenciais das variáveis dependentes, correspondentes às observações de campo.

Quadro 5.19 – Referenciais de campo

Vel [km/h]	Fila RS [m]	Fila RN [m]
19,0	7,9	8,8

Assim, a partir das equações de ajuste, foi calculado o Quadro 5.20. Cada linha da representa uma solução estimada a partir das equações. O erro médio constitui um indicador agregado de desempenho de cada cenário avaliado, e representa a média aritmética entre os erros relativos, em módulo, das três variáveis dependentes.

Quadro 5.20 – Estimativas dos modelos calibrados

Variáveis independentes		Variáveis dependentes			Erro relativo [%]			Erro Médio [%]
Fac	Fv	Vel [km/h]	Fila RS [m]	Fila RN [m]	Vel [km/h]	Fila RS [m]	Fila RN [m]	
0,50	1,69	19,0	9,3	5,4	0%	18%	-38%	19%
0,60	1,63	19,0	9,0	5,3	0%	13%	-40%	18%
0,70	1,57	19,0	8,6	5,1	0%	9%	-42%	17%
0,80	1,52	19,0	8,3	4,9	0%	5%	-44%	16%
0,90	1,46	19,0	8,0	4,8	0%	1%	-46%	16%
1,00	1,41	19,0	7,6	4,6	0%	-3%	-47%	17%
1,10	1,35	19,0	7,3	4,5	0%	-8%	-49%	19%
1,20	1,30	19,0	7,0	4,3	0%	-12%	-51%	21%
1,30	1,24	19,0	6,6	4,2	0%	-16%	-53%	23%
1,40	1,19	19,0	6,3	4,0	0%	-20%	-55%	25%
1,50	1,13	19,0	6,0	3,8	0%	-24%	-56%	27%

O quadro acima indica que a solução que minimiza o erro agregado corresponde a valores de aceleração com fator multiplicador entre 0,8 e 0,9. A solução que minimiza o erro da variável Fila RS está associada a um fator de aceleração equivalente 0,9. Também é possível concluir que os erros de estimativa da fila RN são elevados, superando sempre 40%.

5.7.2 O modelo calibrado

A partir dos valores de parâmetros indicados pelas seções 5.7.1.3 e 5.7.1.4, novas simulações foram rodadas considerando, agora, dez sementes estocásticas diferentes. As variáveis independentes Fv e Fac sofreram ajustes marginais e a solução foi identificada, com base em tentativa e erro, através do desempenho agregado dos dez modelos obtidos.

Os referenciais permanecem as medições de campo dispostos no Quadro 5.19: comprimento das filas médias na interseção da rua Ramiro Barcelos (Fila RN e fila RS), e a velocidade média na av. Independência. Outra consideração importante foi tentar enquadrar a variável Fv entre 1,53 e 2,30. Esta faixa assegura, em média, velocidades desejadas entre 40 e 60 km/h.

5.7.3 Verificação do ajuste

O modelo calibrado obteve o valor do fator de aceleração equivalente a 0,85. O fator de velocidades assumiu valor 1,46.

O Quadro 5.21 apresenta as estimativas dos parâmetros DRACULA comparadas com os valores referenciais de campo que subsidiaram a etapa de calibração. O quadro

corresponde à média dos valores estimados por dez modelos diferentes, obtidos a partir de simulações estocásticas diferentes.

Quadro 5.21 – Resultados médios para o modelo DRACULA calibrado

Parâmetro	Medição de campo	DRACULA calibrado
Velocidade av. Independência [km/h]	19,0	19,0
Fluxo efetivo na rede [veic/h]	4733	4734
Tempo de esvaziamento da rede [min]	63	64,6
Fila na Ramiro Barcelos, pista sul [m]	7,9	5,9
Fila na Ramiro Barcelos, pista norte [m]	8,8	3,8

O Quadro 5.22 discrimina os resultados de cada um dos dez modelos obtidos com os parâmetros calibrados.

Quadro 5.22 – Resultados DRACULA: dez simulações

Rodada	Fluxo [veic/h]	Tempo [min]	Velocidade [km/h]	Fila SA [m]	Fila RS [m]	Fila RN [m]
1	4701	65,3	19,6	8,6	5,5	3,3
2	4760	63,7	17,0	8,5	6,2	3,7
3	4766	65,4	17,8	8,5	6,3	4,0
4	4744	65,6	17,7	10,4	6,1	4,2
5	4654	62,6	21,0	3,5	5,9	3,5
6	4778	65,3	18,4	4,8	6,3	4,3
7	4766	62,4	20,6	4,7	5,5	3,6
8	4706	63,6	21,2	3,8	5,9	4,0
9	4759	68,4	16,5	11,2	5,6	3,9
10	4710	63,7	20,0	3,6	5,6	3,8
Média	4734	64,6	19,0	6,7	5,9	3,8
Desvio Padrão	39,8	1,8	1,7	3,0	0,3	0,3
Coeficiente variação	0,0	0,0	0,1	0,4	0,1	0,1
Valor mínimo	4654	62,4	16,5	3,5	5,5	3,3
Valor máximo	4778	68,4	21,2	11,2	6,3	4,3

Ao longo do processo de calibração, é importante destacar a dificuldade prática de se obter ajustes satisfatórios (em comparação com os valores referenciais) das estimativas de filas do DRACULA. Através do quadro acima, é possível identificar que a variabilidade na estimativa da Fila SA é bastante elevada, onde a estimativa oscila entre 3,5 e 11,2 m. Os comprimentos das filas da Ramiro Barcelos apresentaram menor variabilidade, mas os valores médios não reproduziram satisfatoriamente as observações de campo.

As afirmações acima corroboram as conclusões de Lind *et al.* (1999). O estudo relata uma aplicação e comparação dos modelos DRACULA, AIMSUN2 e NEMIS em um trecho viário em Leeds. No estudo, o DRACULA apresentou estimativas inadequadas dos

comprimentos de filas, indicando problemas para modelar interseções viárias próximas à saturação.

5.7.4 Análise de consistência da velocidade desejada

O modelo DRACULA têm sua consistência avaliada através das velocidades gerais, que são comparadas com as observações de campo. A velocidade geral é confrontada, trecho a trecho.

As velocidades gerais entre os trechos da rede são comparadas com a medição de campo no Quadro 5.23.

Quadro 5.23 - Velocidades gerais nos trechos

Trecho viário	Observação campo [km/h]	Estimativa DRACULA [km/h]
Barros Cassal - Garibaldi	17,5	19,0
Garibaldi - Santo Antonio	17,2	17,6
João Telles - Ramiro (S)	27,5	25,7
João Telles - Ramiro (N)	34,9	37,5
Médio	24,3	24,9

Na Figura 5.11, os valores de velocidades nos trechos são comparados através de gráfico de barras.

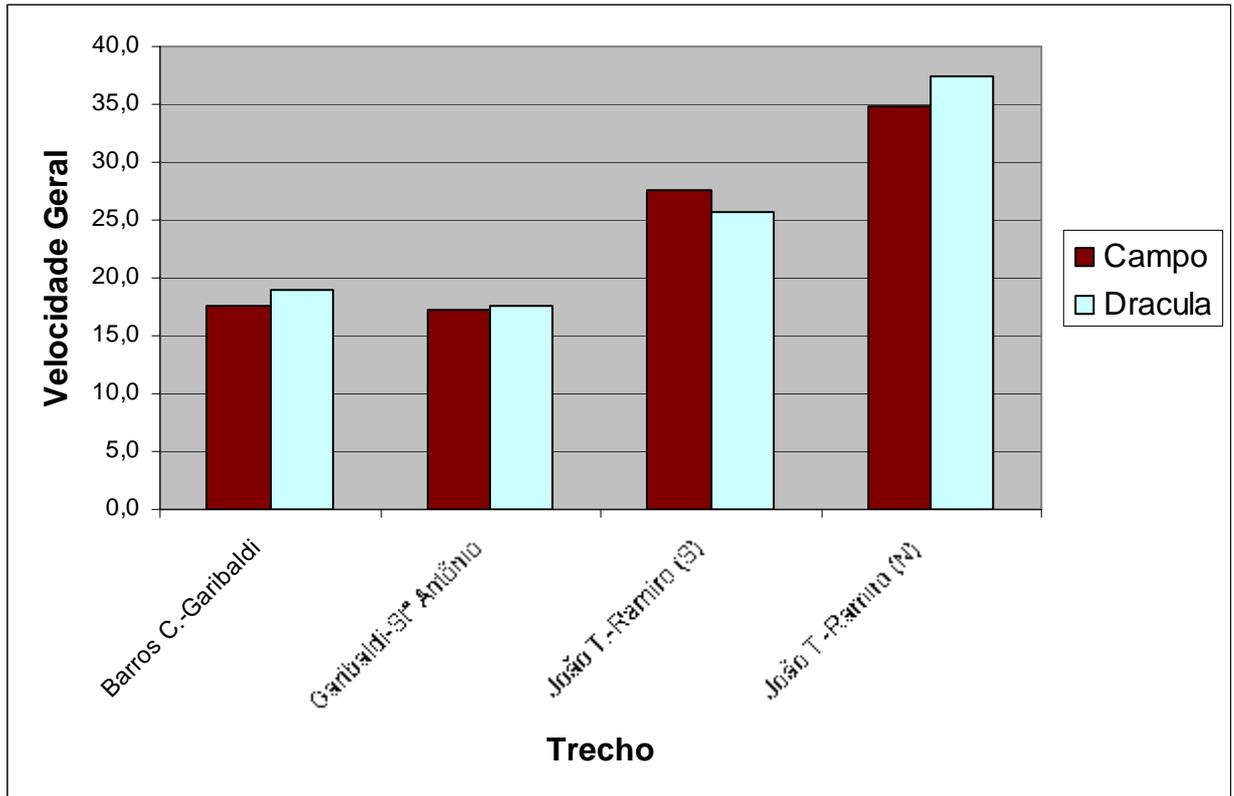


Figura 5.11 – Comparação das velocidades gerais nos trechos

A Figura 5.12 apresenta a reta de ajuste entre a variável de campo e a estimativa do modelo.

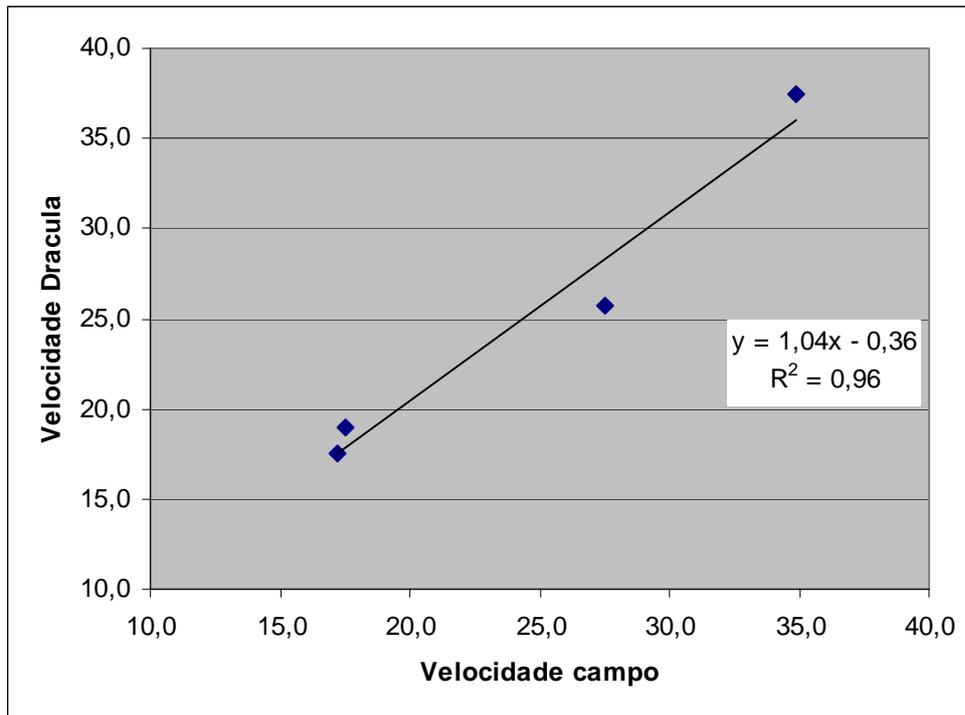


Figura 5.12 – Reta de ajuste das velocidades gerais nos trechos

Através das figuras acima, é possível concluir que a estimativa de velocidades gerais do DRACULA foi bastante satisfatória, reproduzido bem a realidade observada em campo.

O produto entre o fator de velocidades (ajustado em 1,46) e a velocidade de cruzeiro média da rede, gera uma velocidade desejada média de 38 km/h. A bibliografia indica que a velocidade desejada é restringida pelos limites de velocidade na via. Na av. Independência, esses limites situam-se na faixa entre 40 e 60 km/h. O valor reduzido obtido não significa, necessariamente, uma inconsistência. É importante salientar que um importante elemento redutor na velocidade geral não foi contemplado na modelagem: o acesso dos veículos de transporte público às paradas. Assim, o fator de velocidades reduzido agregou o efeito perturbador desse elemento.

5.7.5 Comparação de resultados: SATURN X DRACULA

A seguir, são comparados os resultados dos modelos SATURN e DRACULA calibrados.

Resultados agregados

Os resultados estimados pelos modelos, para toda a rede, constam no Quadro 5.24.

Quadro 5.24 - Resultados agregados da rede

Parâmetro	SATURN	DRACULA default	DRACULA ajustado
Tempo total (veic x h)	194,1	321,7	181,6
Atrasos totais (veic x h)	58,7	226,3	116,4
Velocidade Média (km/h)	17,3	9,6	18,1
Viagens efetuadas (veic)	4733	4495	4734

As medidas de calibração do DRACULA tornaram os resultados do modelo mais similares às estimativas do SATURN. Os tempos totais de viagem na rede, as velocidades médias e os fluxos efetivos, apresentaram boa equivalência entre os modelos. Deve-se salientar, entretanto, que o SATURN superestimou marginalmente o tempo total de viagem resultando numa velocidade média um pouco inferior que a estimativa do DRACULA. A similaridade satisfatória de resultados, entretanto, sugere que parâmetros agregados de um modelo SATURN calibrado podem ser adotados como referencial de calibração para o DRACULA.

5.8 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

O presente capítulo desenvolveu um estudo de caso, onde os modelos SATURN e DRACULA reproduziram a av. Independência, em Porto Alegre. A metodologia adotada contempla a utilização dos modelos em conjunto, e pressupõe a mesma descrição de rede.

A metodologia envolveu as etapas tradicionais de aplicação de modelos: concepção, levantamento de dados, calibração do modelo, validação ou verificação do ajuste, e análise de resultados. Por fim, os resultados estimados pelos modelos foram comparados.

O modelo SATURN foi calibrado com base nos fluxos, e validado através dos atrasos nas interseções (s) e nas filas médias (UVP). O modelo DRACULA foi ajustado por tentativa e erro, com apoio de regressões lineares múltiplas, com base em filas (m) e velocidade (km/h).

Os modelos obtidos apresentaram-se satisfatórios, replicando bem a realidade. A metodologia adotada, entretanto, apresenta limitações. O Capítulo 6 apresenta as conclusões gerais do estudo, avaliando a metodologia aplicada.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

6.1 APRESENTAÇÃO DO CAPÍTULO

A presente dissertação de mestrado comparou as estruturas de simulação dos modelos SATURN e DRACULA. O estudo apontou recomendações sobre a aplicação prática dos modelos, especialmente quando há exportação de informações do SATURN para o DRACULA, como a descrição de rede e demanda. Nas próximas seções, apresentamos as principais conclusões do estudo.

As análises envolveram:

- a) A comparação das fundamentações teóricas do SATURN e do DRACULA concentrando-se nos dados de entrada, características específicas da simulação, e parâmetros de saída.
- b) O desenvolvimento de análises de sensibilidade, que permitiram caracterizar e comparar os processos de estimação de cada modelo. As análises concentraram-se nos seguintes parâmetros de saída: atrasos, tempos de viagem, velocidades, e capacidade viária.
- c) A partir da fundamentação teórica e dos testes de análise de sensibilidade, foram propostas medidas para aplicação dos modelos, em conjunto.

- d) As medidas propostas foram empregadas e avaliadas em um estudo de caso envolvendo a modelagem da av. Independência, em Porto Alegre, através do SATURN e do DRACULA.

6.2 ANÁLISE COMPARATIVA - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TESTES DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As fundamentações teóricas dos modelos e os testes comparativos de análise de sensibilidade permitiram destacar algumas diferenças conceituais entre dados de entrada e saída, associadas às características específicas de simulação de cada modelo.

Velocidades

O conceito da velocidade geral, que constitui um importante parâmetro de saída, apresenta o mesmo significado no SATURN e no DRACULA.

O dado de entrada “velocidade no arco”, entretanto, assume conceitos diferentes nos modelos. No SATURN, o valor definido corresponde à velocidade de cruzeiro. No DRACULA, corresponde à velocidade média desejada pelos motoristas. Devidos aos diferentes conceitos e às diferentes estruturas de modelagem, os modelos apresentem comportamentos distintos no que se refere a estimativa de velocidades gerais.

Para a mesma descrição de rede, a velocidade geral no DRACULA obtida com os valores *default* de características dos veículos, é subestimada em relação ao SATURN. Os resultados indicam que, para arcos curtos muito carregados, as divergências de resultados entre os modelos se acentuam.

Como sugestão de modelagem para o uso conjunto, propomos que a velocidade de cruzeiro do SATURN seja adotada como base para determinação da velocidade desejada, através da multiplicação pelo fator de velocidades dos veículos. A sugestão é válida em situações restritas: é importante que a rede apresente características homogêneas, como hierarquia viária, nível de saturação reduzidos e demais fatores relacionados às velocidades de cruzeiro e desejada.

Atrasos e tempos de viagem

O conceito de atraso no SATURN está associado ao tempo perdido junto à interseção viária, em reação ao controle de tráfego da interseção. Já os atrasos no DRACULA se referem à margem de tempo entre a velocidade corrente, em cada passo, e a velocidade desejada.

Os tempos totais de viagem, por sua vez, agregam os tempos integrais para percorrer determinado trecho e apresentam equivalência conceitual entre os modelos.

Modelagem de capacidades viárias

No SATURN, a capacidade viária é fortemente influenciada pelo usuário do modelo, através da definição dos fluxos de saturação das interseções. No DRACULA, a capacidade viária é uma propriedade decorrente do comportamento agregado dos veículos na modelagem, não sendo estimada através de um parâmetro de saída específico.

A modelagem da capacidade viária no DRACULA depende de muitos fatores que contribuem na definição da velocidade do veículo junto à linha de retenção. Os fatores envolvem a descrição de rede, as características dos veículos e parâmetros comportamentais, e características da demanda como composição do tráfego.

6.3 ESTUDO DE CASO – MODELAGEM DA AV. INDEPENDÊNCIA

O estudo de caso avaliou a modelagem de um cenário através do SATURN e do DRACULA. As conclusões decorrem da experiência adquirida na modelagem da av. Independência, em Porto Alegre.

6.3.1 Metodologia empregada

Coleta de dados e codificação dos modelos

Neste estudo de caso, foi utilizada, originalmente, a mesma descrição de rede codificada para o SATURN. A velocidade desejada do DRACULA foi definida pelo produto entre a velocidade de cruzeiro do SATURN e o fator de velocidades. As estimativas produzidas pelo SATURN contribuíram no ajuste de parâmetros do DRACULA.

A coleta de dados envolveu a obtenção, em campo, das seguintes informações: velocidades de cruzeiro e velocidade geral nos trechos, fluxos nas conversões e composição do tráfego, comprimentos de fila (em “veic” e em “m”) e atrasos nas filas (veic × s). Foram apresentadas as técnicas de coleta e apropriação de dados.

A demanda de tráfego foi exportada do SATURN para o DRACULA, onde foi preciso converter o fluxo em UVP/h para fluxo em veículos/h.

Calibração dos modelos

A demanda na rede expressa na forma de matriz origem-destino, foi calibrada no SATURN, através das contagens volumétricas, utilizando-se o módulo de maximização de entropia ME2.

A calibração dos parâmetros comportamentais e características dos veículos do DRACULA foi desenvolvida por tentativa e erro, com apoio de análises de sensibilidade por regressões lineares múltiplas. Os valores referenciais na calibração adotados correspondem às medições de filas e às velocidades gerais na rede.

A metodologia de calibração do DRACULA proposta se deu em seis fases com objetivos, elementos de análise, e dados-alvos distintos: ajuste da descrição de rede; avaliação do modelo microscópico *default*; ajuste preliminar de parâmetros; análises de sensibilidade por regressões lineares múltiplas; ajuste definitivo baseado nas observações de campo; verificação do ajuste do modelo através da comparação com o SATURN.

Validação dos modelos

O SATURN foi validado através de atrasos em fila (segundos) e fila média (veículos).

Os referenciais para verificação do ajuste do DRACULA foram os parâmetros medidos em campo (velocidade geral, comprimento de fila). Os resultados também foram comparados com o modelo SATURN validado.

6.3.2 Análise de resultados

A descrição de rede adequada para o SATURN não foi integralmente satisfatória para o DRACULA. Para reproduzir corretamente os fluxos efetivos na interseção prioritária junto à rua João Telles, foi necessário aumentar o número de faixas alocadas para uma conversão.

As velocidades de cruzeiro nos arcos SATURN não são adequadas para expressar diretamente a velocidade desejada para o DRACULA, gerando velocidades gerais subestimadas. A adoção da velocidade de cruzeiro como base para a definição da velocidade desejada, através da multiplicação uniforme pelo fator de velocidades, entretanto, apresentou-se como uma medida satisfatória.

Os conceitos de atraso nos modelos são apropriados de formas diferentes, de modo que as diferenças encontradas foram notáveis. No SATURN, refere-se ao atraso na interseção viária, e no DRACULA agrega também os atrasos no arco, em relação à velocidade desejada.

O SATURN apresentou ajuste satisfatório, em relação à realidade de campo, para os atrasos e filas médios. Já as estimativas de filas do DRACULA não apresentaram boa equivalência com a realidade, apresentando grande variabilidade para modelos similares com sementes estocásticas diferentes.

A avaliação do modelo obtido com os valores *default* dos parâmetros do DRACULA sugere que o motorista típico observado em campo tem comportamento mais agressivo. Para calibração foi sugerido aumentar as velocidades desejadas, ajustar as taxas de aceleração normal e máxima, e aumentar os estímulos de ultrapassagens.

A etapa de calibração do DRACULA apresentou maior grau de complexidade, em relação ao SATURN. O DRACULA é um simulador microscópico, que reproduz aspectos comportamentais dos motoristas e a variabilidade aleatória dos dados. A variedade de fenômenos modelados é maior, além do fato desses fenômenos interagirem simultaneamente.

A multiplicidade de variáveis a calibrar implica na ocorrência de múltiplas soluções que atendem às condições de contorno matemáticas. Para reduzir o domínio de soluções viáveis, é preciso embasar-se em referenciais. Os valores referenciais podem ser obtidos a partir de coletas de dados adicionais, da bibliografia, ou mesmo de estimativas de outros modelos.

Os resultados agregados da rede e as velocidades gerais nos trechos, estimados por cada modelo, apresentaram valores similares. Assim, um modelo SATURN calibrado pode ser adotado como referencial de calibração para o DRACULA.

A definição da velocidade desejada no DRACULA, através do produto entre a velocidade de cruzeiro e o fator de velocidades, permitiu a obtenção de um modelo DRACULA consistente. Vale ressaltar, que a estimação de filas, justamente naquele arco que apresentou menor velocidade de cruzeiro da rede, não foi satisfatória.

Os modelos DRACULA com diferentes sementes estocásticas apresentaram grande variabilidade na estimativa de comprimento de fila.

A etapa de calibração do DRACULA, baseada em tentativa e erro, gerou um modelo satisfatório. As medidas empregadas na modelagem apresentaram as seguintes limitações:

- A definição da velocidade desejada no DRACULA pelo produto entre o fator de velocidades e a velocidade de cruzeiro do SATURN é restrita. A rede deverá apresentar características homogêneas, em relação aos fatores que afetam a

velocidade desejada e de cruzeiro. Essas características presumem hierarquia viária similares e baixos níveis de saturação nos arcos da rede.

- O método de calibração de DRACULA por tentativa e erro se fez demasiadamente demorado.
- O uso de regressões lineares múltiplas não permite avaliar outras relações funcionais entre as variáveis.

6.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugerimos pesquisas avaliando as principais limitações da metodologia empregada.

Velocidade desejada e velocidade de cruzeiro

A adoção da velocidade de cruzeiro como base para determinação da velocidade desejada é indicada em condições restritas. Sugerimos pesquisas que quantifiquem e avaliem as relações entre a velocidade desejada, a velocidade de cruzeiro e as características da rede que influenciam essas velocidades como hierarquia viária, níveis de saturação, etc.

Calibração e validação

O DRACULA é um modelo de simulação de tráfego que avalia aspectos comportamentais dos usuários, contemplando os efeitos da variabilidade aleatória. A metodologia de calibração baseada em tentativa e erro apresentou-se complexa e demorada, em acordo à expectativa da bibliografia (conforme seção 2.5.3).

Para trabalhos futuros, propomos a adoção de métodos de otimização para a calibração do DRACULA. Trabalhos recentes revelam o uso de projeto de experimentos, algoritmos genéticos, e algoritmo simplex para calibração de outros modelos microscópicos de simulação de tráfego.

A coleta manual dos dados limitou o volume de dados nas análises de calibração e validação. Sugerimos a adoção de métodos automatizados de coleta, para aumentar a quantidade e a confiabilidade das informações.

Sobre a validação do DRACULA, propomos a adoção de testes estatísticos mais rigorosos como a comparação de médias e análise de séries temporais. Ainda sobre a validação, sugerimos avaliar o desempenho dos parâmetros calibrados do DRACULA aplicando-os a outro cenário (rede e demanda) relativo a um ambiente similar ao cenário que subsidiou a calibração do modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADEN, T. S. **Variability studies using SATURN and DRACULA**. Leeds, UK, 1995. 58p. (Msc. Thesis) – Institute for Transport Studies, Department of Civil Engineering, University of Leeds, 1995.
- ALGERS, S.; BERNAUER, E.; BOERO, M.; BREHERET, L.; DI TARANTO, C.; DOUGHERTY, M.; FOX, K.; GABARD J. F. **Review of micro-simulation models**, 1997. 60 p. (Deliverable 3 of the SMARTEST Project) Disponível em url: <http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv3.html>>. Acesso em maio de 2002.
- ARAÚJO, D. R. C.; CYBIS H. B. B. Aplicação do simulador de tráfego DRACULA em Porto Alegre: análise comparativa com o SATURN. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 16., Natal, 2002. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 2002. v. 1, p. 341-352.
- BLOOMBERG, L.; DALE, J. A comparison of VISSIM and CORSIM traffic simulation models on a congested network. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 79., Washington D.C., 2000. **Proceedings...** Washington: TRB, 2000.
- BOXILL, S. A.; YU, L. **An evaluation of traffic simulation models for supporting its development**. Houston, EUA: Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University, 2000. 98 p. (Report n. SWUTC/00/167602-1) Disponível em url: <http://swutc.tamu.edu/Reports/167602-1.pdf>> Acesso em agosto 2001.
- CHORAFFA, A.; FERREIRA, L. J. A, Using SATURN to assess the impacts of traffic management schemes in Liverpool. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 24, n. 1, 1983.
- CROWTHER, B. C. **A comparison of CORSIM and INTEGRATION for the modeling of stationary bottlenecks**. Blacksburg, Virginia, EUA, 2001. 132p. Msc Thesis (Civil and Environmental Engineering) - Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- CYBIS, H. B. B.; L. A. LINDAU, C. T. NODARI, D. R. C. ARAÚJO Calibração e verificação do ajuste do modelo de alocação SATURN à rede de Porto Alegre. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 13., São Carlos, 1999. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 1999. v. 1, p. 325-332.
- FRANK, M.; WOLFE, P. An algorithm for quadratic programming. **Naval Research Logistics Quarterly**, v. 3, p. 95-110, 1956.
- FREITAS, S. L. O.; MOSCARELLI, F.; BRANCO, O. C.; CYBIS, H. B. B.; ARAÚJO, D. R. C.; NODARI, C. T. Uso do modelo SATURN no estudo de impacto de um pólo gerador de viagens no tráfego. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TRANSPORTE E TRÂNSITO, 13., Porto Alegre, 2001. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: ANTP, 2001. 1 CD Rom.

GARTNER, N. H.; MESSER, C.; RATHI, A. K. Introduction. In: GARTNER, N.; MESSER, C.M.; RATHI, A. K. (Eds.) **The revised monograph on traffic flow theory**. EUA: Federal Highway Administration, 1997. Cap. 1. Disponível em url: <<http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/CHAP1.PDF>> Acesso em abril de 2002.

GIPPS, P. G. A behavioural car-following model for computer simulation. **Transportation Research B**, v. 15, n. 2, p. 105-111, 1981.

HALL, F.; BLOOMBERG, L.; ROUPHAIL, N.; EADS, B.; MAY, A. D. Validation results for four models of oversaturated freeway facilities. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 79., Washington D.C., 2000. **Proceedings...** Washington: TRB, 2000.

HALL, M. D.; VAN VLIET, D.; WILLUMSEN, L. G. SATURN: a simulation-assignment model for the evaluation of traffic management schemes. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 21, n. 4, p. 168-176, 1980.

HOOGENDOORN, S. P.; BOVY, P. H. L. **State of the art of Vehicular Traffic Flow Modelling**. Special Issue on Road Traffic Modelling and Control of the Journal of Systems and Control Engineering. 2001. 46 p. Disponível em url: <http://cttrailf.ct.tudelft.nl/T&E/papers_course_IV_9/state-of-the-art.pdf> Acesso em maio de 2002.

HOURLAKIS, J.; MICHALOPOULOS, P. G.; KOTTOMMANNIL, J. A practical procedure for calibrating microscopic traffic simulation models. In: TRANSPORTATION RESEARCH BOARD ANNUAL MEETING, 82., Washington D.C., 2003. **Proceedings...** Washington: TRB, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA; ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES PÚBLICOS – ANTP. Redução das deseconomias urbanas com a melhoria do transporte público. **Revista dos Transportes Públicos**, n. 82, p. 35-92, 1999.

LABORATÓRIO DE SISTEMAS DE TRANSPORTES - LASTRAN. Porto Alegre: 1997. **Redução das deseconomias urbanas com melhoria do transporte público**. LASTRAN - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Relatório Técnico.

LIEBERMAN, E.; RATHI, A. K. Traffic Simulation. In: GARTNER, N.; MESSER, C.M.; RATHI, A. K. (Eds.) **The revised monograph on traffic flow theory**. EUA: Federal Highway Administration, 1997. Cap. 10. Disponível em url: <<http://www-cta.ornl.gov/cta/research/trb/CHAP1.PDF>> Acesso em junho de 2002.

LIND G.; SCHMIDT, K.; ANDERSON, H.; ALGERS, S.; CANEPARI, G.; DI TARANTO, C.; BERNAUER, E.; BRÉHERET, L.; GABART, J. F.; FOX, K. **Best Practice Manual**. 1999. (Deliverable D8 of the SMARTTEST Project) Disponível em url: <<http://www.its.leeds.ac.uk/projects/smartest/deliv8f.html>> Acesso em abril de 2002.

LIU, R. **DRACULA microscopic traffic simulator**. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1994. (ITS Working Paper 431)

LIU, R. **DRACULA traffic simulation model: a user guide**. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2000. (Technical Note 407)

LIU, R.; SHEPHERD, S.; SCHMÖCKER, J. **Results of micro-simulation applied to the simple network and to the Minicam network**. Technical Report of DETR, Project PPAD/9/84/30: Analysis of congested Networks, Annex C from Deliverable no 5/6. 2001. Disponível em url: <<http://www.dft.gov.uk/itwp/economic/>> Acesso em maio de 2002.

LIU, R.; VAN VLIET, D.; WATLING, D. DRACULA: microscopic, day-to-day dynamic modelling of traffic assignment and simulation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLICATIONS OF ADVANCED TECHNOLOGIES IN TRANSPORTATION ENGINEERING, 4., 1995, Capri. **Proceedings...** Capri: 1995. p. 444-448.

CLARK, S. D.; LIU, R.; MONTGOMERY, F.; TATE, J. **The microscopic modelling of kerb guided bus schemes**. Trabalho apresentado no Transport Research Board Annual Conference, Washington, D.C., 2000.

MATZOROS, T.; VAN VLIET, D.; RANDLE, J.; WESTON B. A validation of the SATURN and ME2 models using before-and-after survey data from Manchester. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 28, n. 12, p. 641-643, 1987.

MAY, A. D.; PHU-NUAL, K.; MONTGOMERY, F. O.; PAKSARSAWAN, S.; VAN VUREN, T. Applications of SATURN in Bangkok. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 34, n. 1, p. 20-27, 1992.

MAY, A. D. **Traffic Flow Fundamentals**. Englewood Cliffs New Jersey: Prentice Hall, 1990. 464 p.

MCSHEEN, J. R.; HALE, R. C. Traffic Modelling in Kuwait: 1. development of a SATURN network database. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 30, n. 10, p. 466-473, 1989.

MIDDLETON, M. D.; COONER, S. A. **Evaluation of Simulation Models for Congested Dallas Freeways**. Austin, Texas: Texas Transportation Institute, 1999. Report n. TX-00/3943-1. Disponível em url: <<http://tti.tamu.edu/product/catalog/reports/3943-1.pdf>> Acesso em agosto de 2002.

MILAM, R.; CHOA, F. Recommended Guidelines for the Calibration and Validation of Traffic Simulation Models. In: TRB CONFERENCE ON THE APPLICATION OF TRANSPORTATION PLANNING METHODS, 8., Texas, 2001. **Proceedings eletrônico...** Disponível em url: <http://www.fehrandpeers.com/publications/pubs_set.html>. Acessado junho de 2002.

MUIZELAAR, T. J. **One-way inner ring road in the city of York: effects on traffic and the environment.** Leeds, UK: 2002. Technical Report.

ORTUZAR, J. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport.** 2. ed., UK. John Wiley & Sons, 1994.

PINTO, A. B.; CYBIS, H. B. B.; ARAÚJO, D. R. C.; LINDAU, L. A. Utilização de um Sistema de Informação Geográfica como plataforma para aplicação do modelo SATURN. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 12., Fortaleza, 1998. **Anais...** Rio de Janeiro: ANPET, 1988. v. 2, p. 18-23.

PREVEDOUROS, P. D.; WANG, Y. Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in Replicating Volumes and Speeds on Three Small Networks. **Transportation Research Record**, n. 1644, p. 80-92, 1998.

PURSULA, M. Simulation of Traffic Systems: an Overview. **Journal of Geographic Information and Decision Analysis**, v. 3, n. 1, p. 1-8, 1999.

RAKHA, H. A.; VAN AERDE, M. W. Comparison of simulation modules of TRANSYT and integration models. **Transportation Research Record**, n. 1566, p. 1-7, 1996.

RAO, L.; OWEN, L.; GOLDSMAN, D. Development and application of a validation framework for traffic simulation models. WINTER SIMULATION CONFERENCE, 1998. **Proceedings eletrônico...** Disponível em url: <<http://www.informs-cs.org/wsc98papers/147.pdf>> Acesso em junho de 2002. Washington, D.C.

ROBERTSON, D. I. SATURN: cyclic flow profiles. **Traffic Engineering & Control**, London, v. 15, p. 640-641, 1974.

SILVA, P. C. M.; TYLER, N. Sobre a validação de modelos microscópicos de tráfego. **Transportes**, v. 10, n. 1, p. 49-64, 2002.

SMITH, S.; WORRALL, R.; RODEN, D.; PFEFER, R. A.; HANKEY, M. **Application of Freeway Simulation Models to Urban Corridors.** Federal Highway Administration – FHWA, U. S. Department of Transportation, 1992. V. I, Final Report. Publication No. FHWA-RD-92 – 103. Disponível em url: http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/%5CJPODOCS%5CREPTS_TE/8HN01!.PDF Acesso em julho de 2002.

SUNIL, T.; RATHI, A. Comparison of NETSIM, NETFLO I AND NETFLO II traffic simulation models for fixed time signal control. **Transportation Research Record**, n. 1566, p. 20-30, 1996.

TIMMS, P.; WATLING, D.; LIU, R. A calibration manual for DRACULA. **ITS Working Paper 478.** Leeds, UK. Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1997.

OWEN, B.; BROCK, G.; MASTBROOK, P.; PAVLIK, R.; RAO, S.; STALLARD, C.; SUNKARI, Z.; ZHANG, Y. **A compendium of Traffic Model Validation Documentation and Recommendations**: Phase I, Tasks A-H. USA: Department of Transportation, 1996.

Disponível em url:

<http://www.itsdocs.fhwa.dot.gov/%5CJPODOCS%5CREPTS_TE/30401!.PDF> Acesso em agosto de 2001.

VAN VLIET, D. SATURN: a modern assignment model. *Traffic Engineering & Control*, London, v. 23, n. 12, p. 578-581, 1982.

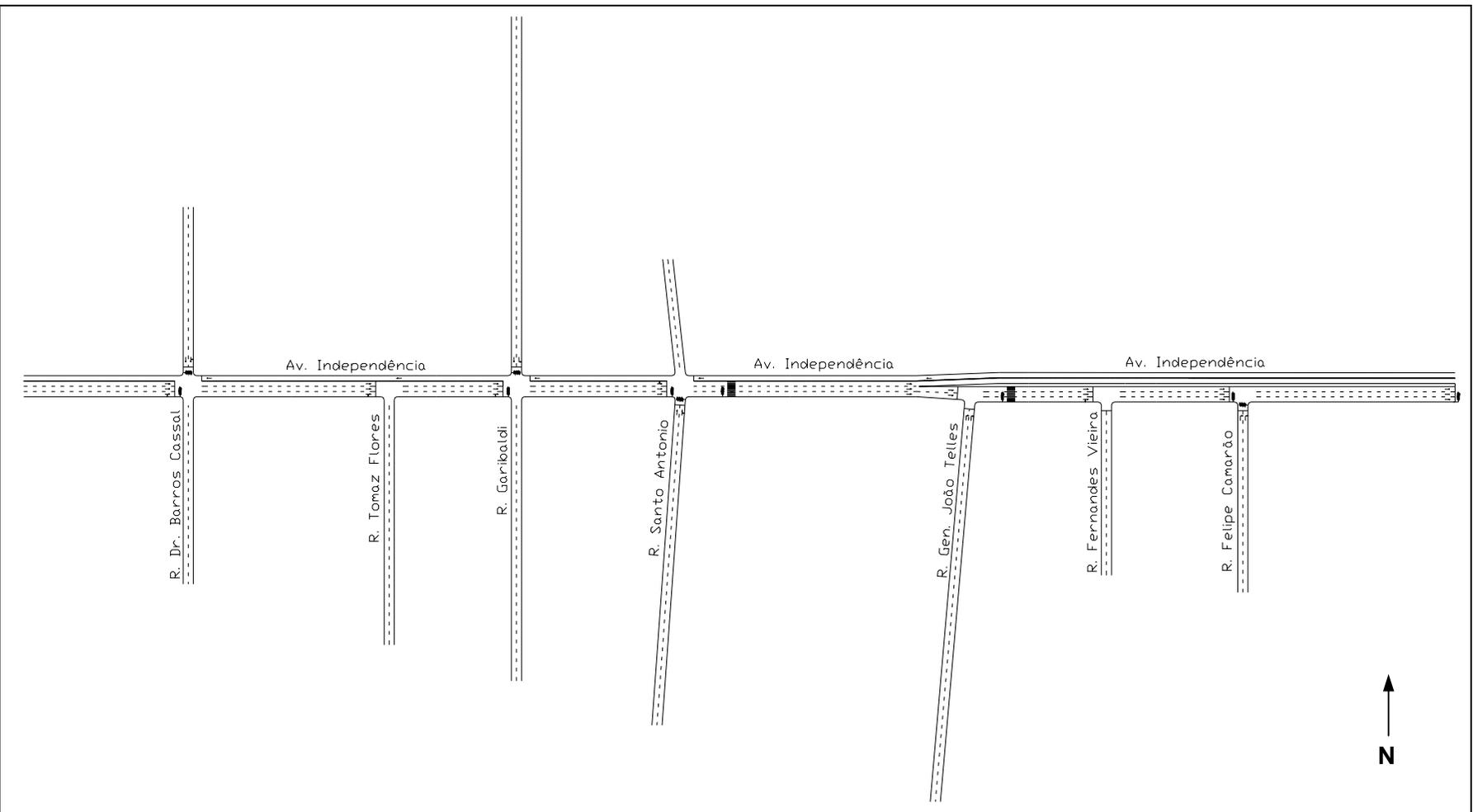
VAN VLIET, D.; HALL, M. **SATURN 10.1**: user manual. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 2000.

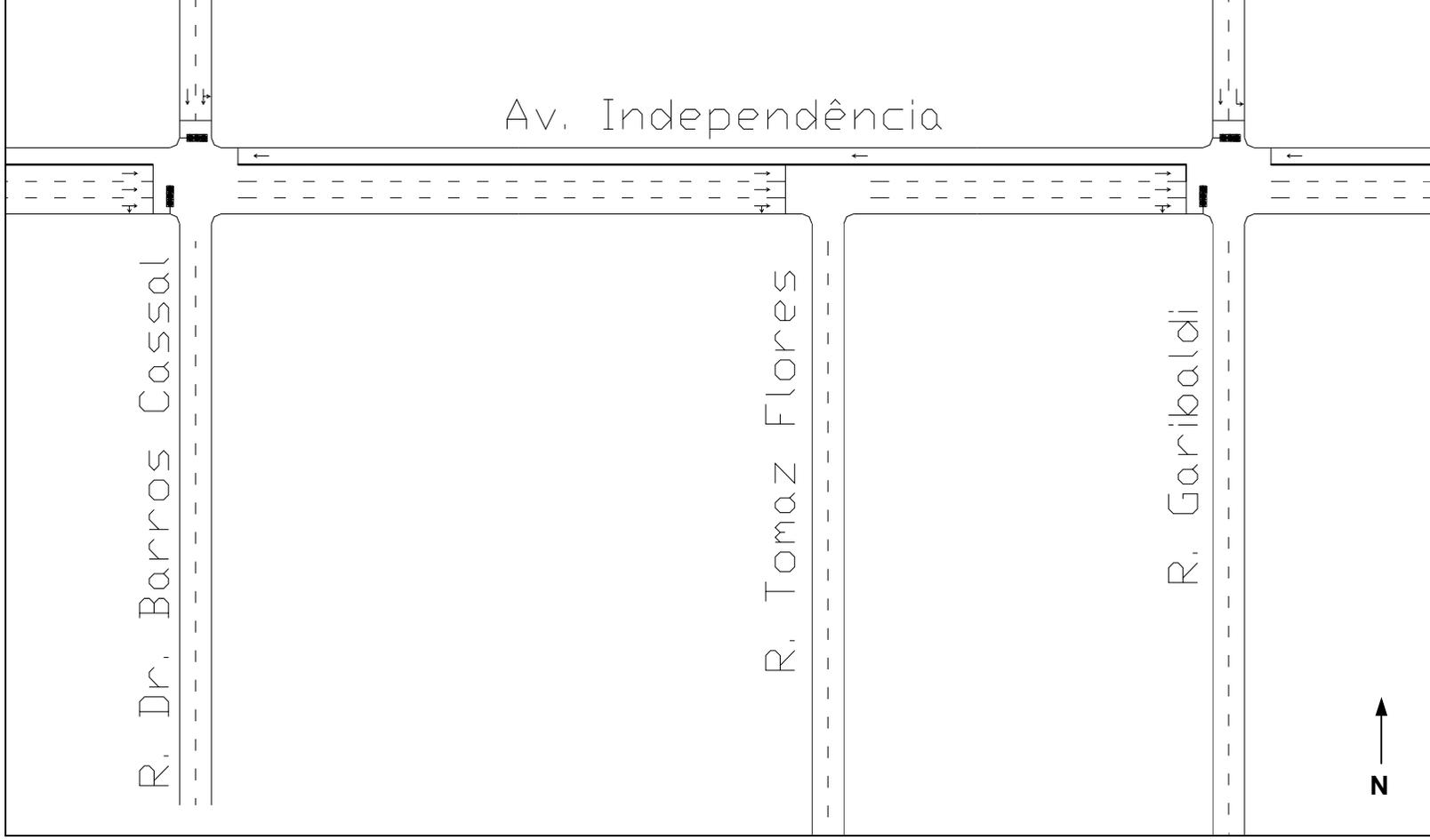
VINCENT, R. A.; MITCHELL, A. I.; ROBERTSON, D. I. **User Guide to TRANSYT**: version 8. UK: Transportation Research Road Laboratory, 1980. (LR 888)

WARDROP, J. G. Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research. In: INSTITUTE OF CIVIL ENGINEERS. **Proceedings...** [s.l.], v. 1, n. 2, p. 325- 378, 1952.

WATLING, D.P. **DRACULA 1.0**: user guide to the day-to-day model. Leeds, UK: Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1995. (ITS Technical Note 369).

ANEXO 1: DETALHAMENTO DA AV. INDEPENDÊNCIA





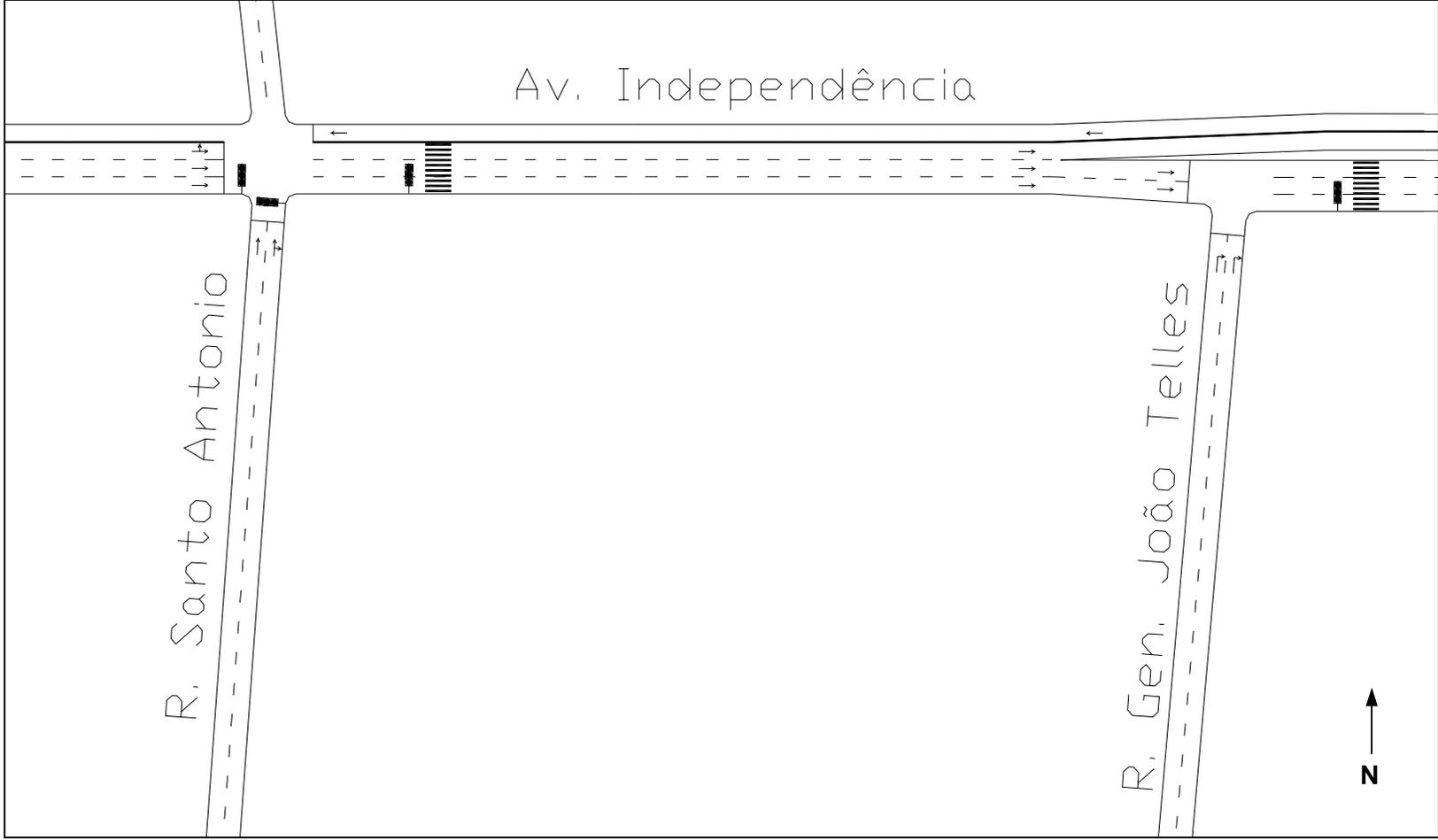
Av. Independência

R. Dr. Barros Cassal

R. Tomaz Flores

R. Garibaldi

N



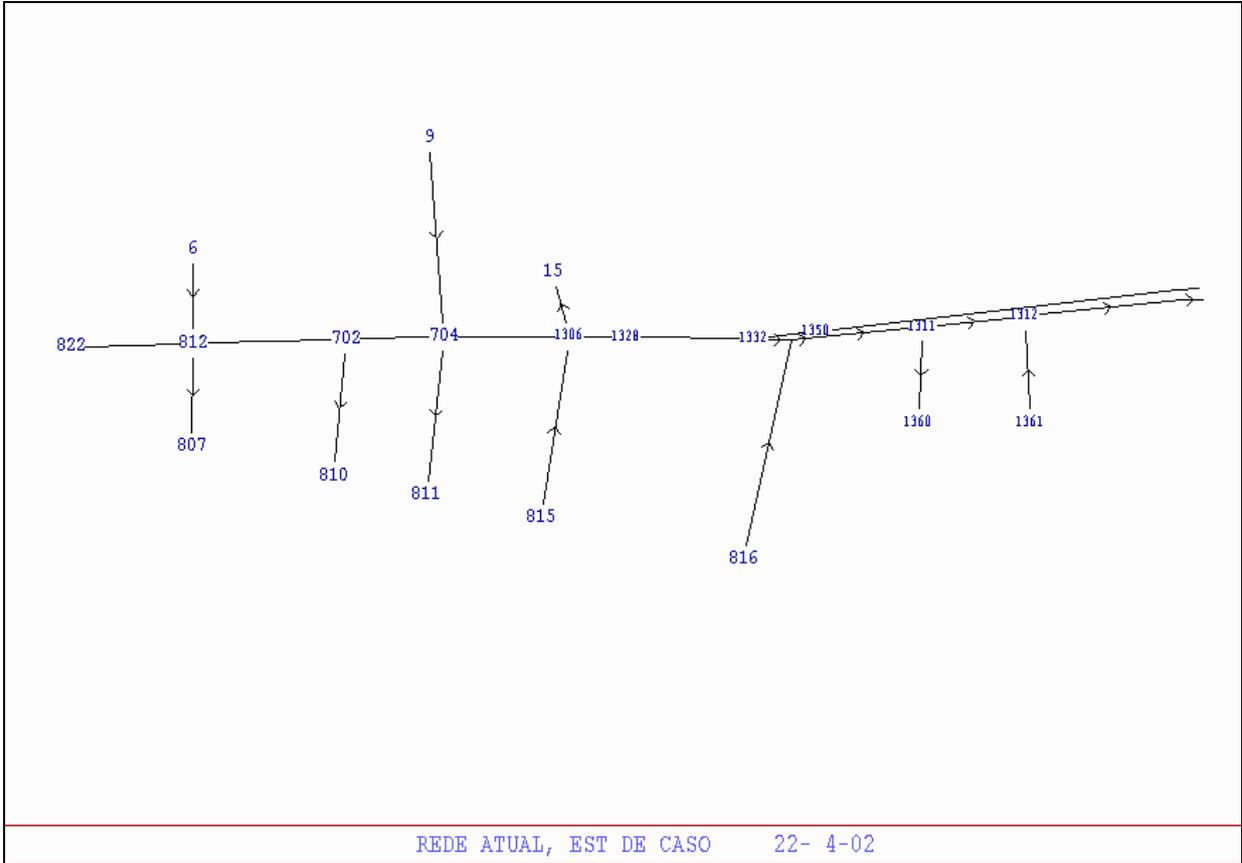
Av. Independência

R. Fernandes Vieira

R. Felipe Camarão



ANEXO 2: NÓS DA REDE DA AV. INDEPENDÊNCIA



ANEXO 3: FILMAGEM DA FILA JUNTO À RUA SANTO ANTÔNIO