



**PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS
FUZZY UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS**

DALIANA BANDEIRA LUZ MONTEIRO SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*
UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS**

DALIANA BANDEIRA LUZ MONTEIRO SANTOS

ORIENTADORA: MARIA ALICE PRUDÊNCIO JACQUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO: TU.DM-006 A/03

BRASÍLIA/DF: JUNHO/2003

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*
UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS**

DALIANA BANDEIRA LUZ MONTEIRO SANTOS

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

**MARIA ALICE PRUDÊNCIO JACQUES, PhD (UnB)
(ORIENTADORA)**

**PAULO CESAR MARQUES DA SILVA , PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**HELENA BEATRIZ B. CYBIS, PhD (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 27 DE JUNHO DE 2003

FICHA CATALOGRÁFICA

SANTOS, DALIANA BANDEIRA LUZ MONTEIRO

Procedimento para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos. Brasília, 2003.

106p, 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2003).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Controladores semafóricos

2. Controladores semafóricos *fuzzy*

3. Lógica *fuzzy*

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SANTOS, D. B. L. M., (2003). Procedimento para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM 006A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 106p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Daliana Bandeira Luz Monteiro Santos

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Procedimento para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos.

GRAU/ANO: Mestre / 2003.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Daliana Bandeira Luz Monteiro Santos
Universidade de Brasília
Rua José Ovídio vale, 1907. Morro Branco
59015-410 Natal/RN

DEDICATÓRIA

*A Deus,
Aos meus pais, José Maria e Elêucia, meus irmãos, Juliano, Fabiano e Jordana, minha linda
sobrinha Rafaela e a toda minha família.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro para a realização do Mestrado em Transportes.

À minha professora orientadora Maria Alice, pela sempre disposição em me ajudar, pelos ensinamentos e conhecimentos transmitidos, e que de certa forma, foi muito mais que uma orientadora acadêmica, mas sim orientadora na minha vida nesses últimos 2 anos, pelos sempre sábios conselhos. Aos professores do Mestrado em Transportes, Adelaida, José Augusto, Joaquim, José Alex, Paulo César, Matsuo e, em especial, a nossa coordenadora, professora Yaeko, que sempre fez questão de manter um espírito de fraternidade neste mestrado.

Ao professor Enilson Medeiros pelo incentivo dado e por ter me mostrado este caminho brilhante e interessante que é área de Transportes, e a todos os professores do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aos amigos do DETRAN-RN pelos conhecimentos transmitidos durante os 15 meses de estágio.

Ao Júlio pelo sempre bom humor e disposição em me ajudar, e, em especial, pela amizade e carinho depositado em mim, muito obrigada. Aos funcionários da secretaria, Adélias e Simone.

Aos técnicos do SITRAN, Denise e Herbert, do DETRAN-DF, Luiz Felipe e César Viana, da EPTC-RS, Odoni Branco, Tales Roberto e Paulo Haro, do CEFTRU, Bruno e Renato, pelo apoio e colaboração para a realização desta pesquisa. Em especial ao professor Raul, do Departamento de Estatística – UnB, pela sempre disposição em me auxiliar. Ao professor Matti Pursula e aos pesquisadores Iisakki Kosonen e Peter Pecovnik, da *Helsinki University of Technology* pelo apoio com o *software* HUTSIM para realização desta pesquisa.

Aos meus amigos de moradia, Andréa, Bruno e Selma. Aos meus amigos de turma, Liliane, Ana Cláudia, Eliane, Patrícia, Evaldo, Eliezé, Eldson, George, Marcelo, Sussumu, Lorena,

Carlos Eduardo, Rodrigo e Cristiano pelos conhecimentos compartilhados e pelos inúmeros momentos de alegria que vivemos aqui.

Aos amigos que aqui já estavam, Hilba (que desde a graduação é presença importante em minha vida), Rozângela, Luciana, Leila, Milena e Tito. Gostaria de agradecer em especial ao Cristiano, que depois de uma temporada no Japão parece que voltou só para me acompanhar e me apoiar nesse momento final.

Aos amigos da turma nova, Alessandra, Carla, Elisângela, Selma, Wélter, Édmo, Willer, Michelle e Diógenes. Aos amigos da turma de 2003, em especial, Thadeu, Paulo Guerra, Paulo Tarso, Ednardo, André Gustavo, Luis Gustavo e Geraldo, pela amizade depositada em mim.

Às minhas grandes amigas Bea, Lú, Marcinha, Jupita, Roberta, Lara, Cynthia, Claudinha, Gabi, Rita, Érika, Lud, Janaína, Marília e Camile, que mesmo este tempo todo longe, contei sempre com o carinho e amizade de todas. Gostaria de agradecer em especial a Lú Peixoto, Carol, Cristina e Nielsen, meus amigões do coração. Aos meus queridos amigos Adriano, Ricardo, Renato, George, Eliezé, Luis Cláudio e Túlio.

Às minhas queridas amigas Babi e Mari, muito obrigada pela amizade de vocês. Gostaria de agradecer pela sincera amizade de Chris, Lilica, Carlota e Zanza, muito obrigada.

À Dona Gilceia pelo carinho e apoio nesses decisivos dias.

RESUMO

PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY* UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

A utilização de controladores semafóricos *fuzzy* em interseções isoladas iniciou-se em 1977, com o trabalho de Pappis e Mamdani, a partir do qual outros trabalhos foram desenvolvidos. Os controladores *fuzzy* são projetados com base no conhecimento e experiência dos especialistas da área.

Os trabalhos existentes, no entanto, registram o uso do conhecimento dos especialistas, mas não indicam a forma empregada para sua aquisição. Outro ponto importante a destacar é que o impacto da definição do processo de *fuzzification*, em termos de partições do universo de discurso e das funções de pertinência na resposta dos controladores, não tem sido explicitamente avaliado.

A presente dissertação avalia o impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores semafóricos e define um procedimento para a definição destes conjuntos junto aos especialistas.

A avaliação do impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores semafóricos foi realizada através de um experimento controlado de simulação do tráfego, utilizando-se o *software* HUTSIM. Foi testado o impacto de diferentes conjuntos para as variáveis de entrada e saída sobre o desempenho do controlador. O teste mostrou que o impacto depende da intensidade do volume de tráfego controlado. Para volumes médios e altos foi verificado impacto significativo para diferentes medidas de desempenho do tráfego e para as variáveis que diretamente representam a resposta do controlador (tempo de verde e duração do ciclo).

O procedimento para aquisição e definição dos conjuntos *fuzzy* foi concebido e testes foram realizados junto aos órgãos de trânsito do Distrito Federal e da cidade de Porto Alegre, comprovando sua eficácia e viabilidade de utilização.

ABSTRACT

PROCEDURE FOR DEFINITION OF FUZZY TRAFFIC SIGNAL CONTROLLERS FUZZY SETS

Traffic signal controllers for isolated intersections have been used since 1977 due to work developed by Pappis and Mandani. Since then, other research studies have been developed. Fuzzy controllers are designed based upon experts' knowledge and experience.

Although existing research shows that experts' knowledge has been used, they do not present the process utilized for its acquisition. Moreover, the impact of the definition of the fuzzification process has not been categorically evaluated regarding the partitions of the universe of discourse and the membership functions on the controller response.

This research analyses the impact of alterations to the fuzzy sets on traffic signal controllers' performance and presents a procedure for the definition of these sets based upon expert knowledge.

An evaluation of this impact in terms of traffic signal controllers' performance was carried out through a controlled traffic simulation experiment, using HUTSIM software. The impact of different sets of input variables on controlled performance was tested. This test showed that the impact depends on the intensity of the controlled traffic volume. It was verified that for high and average volumes the impact was significant in terms of the different measurements for traffic performance and regarding the variations that directly represent the controller response (green time and cycle length).

The procedure for the acquisition and definition of the fuzzy ensembles was formulated and tests conducted through traffic agencies in the Distrito Federal and the city of Porto Alegre proved its efficiency and viability.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – APRESENTAÇÃO	1
1.2 – CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3 – JUSTIFICATIVA	3
1.4 – OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.5 – HIPÓTESES	4
1.6 – ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO	4
CAPÍTULO 2 – CONTROLE DE TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS	6
2.1 – INTRODUÇÃO	6
2.2 – OPERAÇÃO SEMAFÓRICA	6
2.3 – CONCEITOS	10
2.4 – ESTRATÉGIA DE CONTROLE SEMAFÓRICO ATUADO	11
2.5 – CRITÉRIOS USUAIS PARA UTILIZAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS ATUADOS	12
CAPÍTULO 3 – CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY	14
3.1 – INTRODUÇÃO	14
3.2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM CONTROLADOR FUZZY	15
3.2.1 – Interface de <i>fuzzification</i>	16
3.2.2 – Base de conhecimento	17
3.2.3 – Lógica da tomada de decisão	17
3.2.4 – Processo de <i>defuzzification</i>	18
3.3 – MODELOS DE CONTROLADORES FUZZY PARA O CONTROLE DE INTERSEÇÕES	18
3.3.1 – Controlador <i>fuzzy</i> de Pappis e Mamdani	19
3.3.2 – Controlador <i>fuzzy</i> de Jarkko Niittymäki	20
3.3.3 – Controlador <i>fuzzy</i> de José Favilla Jr <i>et al.</i>	21
3.4 – MODELAGEM DE CONTROLADOR FUZZY ATRAVÉS DO SOFTWARE MATLAB	22
3.4.1 – Tipos de controladores	23
3.4.2 – Processo de <i>fuzzification</i> das variáveis de entrada	24
3.4.3 – Aplicação de operadores <i>fuzzy</i> (“E” e “OU”) na parte condicionante da regra	25
3.4.4 – Implicação da condição da regra <i>fuzzy</i> sobre o conseqüente da regra	26
3.4.5 – Agregação das conseqüências produzidas pelas regras	26
3.4.6 – Processo de <i>defuzzification</i>	26
CAPÍTULO 4 – IMPACTO DOS CONJUNTOS FUZZY SOBRE O DESEMPENHO DOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS	28
4.1 – INTRODUÇÃO	28
4.2 – DESENVOLVIMENTO DO MODELO DA INTERSEÇÃO BÁSICA DE ESTUDO	29
4.3 – CARACTERIZAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY BÁSICO NO MATLAB	29
4.4 – DEFINIÇÃO DAS ALTERAÇÕES NOS CONJUNTOS FUZZY INICIAIS PARA SEREM TESTADAS	33
4.5 – SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO SOB CADA PLANILHA PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E VOLUME, COM O PROGRAMA HUTSIM	39
4.5.1 – Resultados das simulações	39
4.5.2 – Avaliação qualitativa dos resultados	50
4.6 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS	52

CAPÍTULO 5 – PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS FUZZY -----	55
5.1 – INTRODUÇÃO -----	55
5.2 – CONCEPÇÃO DO PROCEDIMENTO -----	56
5.3 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO E COLETA DOS DADOS -----	57
5.4 – TRATAMENTO DOS DADOS -----	59
5.4.1 – Definição das funções de pertinência -----	62
5.5 – CONSTRUINDO AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E OS CONJUNTOS FUZZY ---	64
5.6 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS -----	70
CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES -----	72
6.1 – INTRODUÇÃO -----	72
6.2 – CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS E CONSTATAÇÃO DAS HIPÓTESES -----	72
6.3 – LIMITAÇÕES DO ESTUDO -----	73
6.4 – RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS -----	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS -----	75
APÊNDICE A -----	78
APÊNDICE B -----	89
APÊNDICE C -----	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ANOVA – Análise de variância

CV – Coeficiente de Variação

DENATRAN – Departamento Nacional de Trânsito

FLT-M – *Fuzzy Logic Toolbox*

HCM – *HIGHWAY CAPACITY MANUAL*

HUT – *Helsinki University of Technology*

TRB – *Transportation Research Board*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Diagrama de um controlador <i>fuzzy</i> -----	16
Figura 4.1: Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável lingüística fila -----	31
Figura 4.2: Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável lingüística chegada -----	31
Figura 4.3: Conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável lingüística extensão -----	31
Figura 4.4: Superfície de controle referente ao Caso 01 -----	36
Figura 4.5: Operação do controlador <i>fuzzy</i> para as chegadas de 20 veículos com fila de 11 e 12 veículos -----	37
Figura 4.6: Atraso médio (média) -----	43
Figura 4.7: CV para atraso médio -----	44
Figura 4.8: Porcentagem de veículos parados (média) -----	45
Figura 4.9: CV para porcentagem de veículos parados -----	46
Figura 4.10: Tempo médio de verde (média) -----	47
Figura 4.11: CV para tempo médio de verde -----	48
Figura 4.12: Ciclo médio (média) -----	49
Figura 4.13: CV para ciclo médio -----	49
Figura 5.1: Exemplo de situação de tráfego apresentada -----	56
Figura 5.2: Conjunto <i>fuzzy</i> não contém limite de x -----	62
Figura 5.3: Conjunto <i>fuzzy</i> contém limite inferior de x -----	63
Figura 5.4: Conjunto <i>fuzzy</i> contém limite superior de x -----	63
Figura 5.5: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável chegada – especialistas do Distrito Federal -----	66
Figura 5.6: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável chegada – especialistas de Porto Alegre -----	66
Figura 5.7: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável fila – especialistas do Distrito Federal -----	67
Figura 5.8: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável fila – especialistas de Porto Alegre -----	67
Figura 5.9: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável extensão – especialistas do Distrito Federal -----	68
Figura 5.10: Conjunto <i>fuzzy</i> para a variável extensão – especialistas de Porto Alegre -----	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens do controlador de tempo fixo e atuado pelo tráfego -----	10
Tabela 3.1: Principais características dos controladores <i>fuzzy</i> encontrados na literatura ---	22
Tabela 3.2: Principais componentes do FLT-M -----	27
Tabela 4.1: Diferentes níveis de volume de tráfego -----	29
Tabela 4.2: Regras <i>fuzzy</i> implementadas -----	33
Tabela 4.3: Limites dos conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável “fila” nos 7 casos estudados -----	34
Tabela 4.4: Limites dos conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável “chegada” nos 7 casos estudados -----	35
Tabela 4.5: Limites dos conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variável “extensão” nos 7 casos estudados -----	35
Tabela 4.6 – Planilha de controle – Extensão de tempo de verde dada para o Caso 01 (*10 seg) -----	38
Tabela 4.7: Resultados das simulações para a via principal para os três níveis de volume estudados -----	40
Tabela 4.8: Resultados das simulações para a via secundária para os três níveis de volume estudados -----	41
Tabela 4.9: Resultados das simulações para a interseção para os três níveis de volume estudados -----	42
Tabela 4.10: Resultados das simulações para os três níveis de volume estudados para os Casos 01, 04 e 07 -----	51
Tabela 4.11: Resumo das análises de variância para os três níveis de volume estudados --	53
Tabela 5.1: Esquema do questionário aplicado -----	58
Tabela 5.2: Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável “chegada” -----	64
Tabela 5.3: Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável “fila” -----	64
Tabela 5.4: Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos <i>fuzzy</i> da variável extensão -----	65
Tabela 5.5: Limites dos conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para cada variável -----	69

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O número excessivo de automóveis em circulação causa à sociedade vários danos, entre eles: congestionamentos crônicos, poluição sonora e atmosférica, consumo excessivo de combustível, atrasos e alteração na própria configuração espacial do meio urbano.

Procurando minimizar os problemas urbanos associados à circulação de veículos, diversas formas de controle de tráfego vêm sendo utilizadas. Dentre estas, os semáforos podem ser uma das mais eficientes maneiras de controle em uma interseção. No entanto, quando ineficientemente operados, estes podem ocasionar grandes transtornos para a circulação do tráfego que se utiliza das interseções que controlam ou das vias próximas. Os semáforos são equipamentos que alternam o direito de passagem de veículos e/ou pedestres em interseções de duas ou mais vias. Sua implantação é justificada de acordo com os seguintes critérios: volumes veiculares mínimos, interrupção de tráfego contínuo, volumes conflitantes em interseções de cinco ou mais aproximações, volumes mínimos de pedestres que cruzam a via principal, índice de acidentes, melhoria do sistema progressivo, controle de áreas congestionadas ou a combinação de alguns desses critérios (DENATRAN, 1984).

A instalação e a operação eficientes da sinalização semafórica requerem um adequado conhecimento dos diversos elementos que a compõem, considerando critérios técnicos. Inicialmente, a medida de desempenho principal para julgar a eficiência do semáforo era a redução do atraso dos veículos e suas paradas. Entretanto, uma diminuição do consumo de combustíveis, da emissão de poluentes, do ruído, do comprimento das filas e um aumento da segurança também são desejáveis. O controlador semafórico deve, na medida do possível, lidar com todas estas exigências. O semáforo pode ser programado para operar de forma isolada ou em rede com os semáforos das interseções adjacentes. Além disso, o controle pode responder diretamente às condições reais do tráfego (operação atuada) ou ser projetado a partir de dados históricos das condições de tráfego no local (operação em tempo fixo).

A programação dos semáforos atuados pelo tráfego pode ser feita através do uso de diversas técnicas, como por exemplo, a otimização de uma função objetivo que represente o desempenho do tráfego sob determinado plano semaforico. Outra técnica que está sendo proposta e testada com sucesso desde 1977 é o uso da lógica *fuzzy* (Niittymäki e Nevala, 2001; Jacques *et al.*, 2002b).

O projeto de controladores de tráfego *fuzzy* requer o conhecimento do especialista e a experiência do controlador de tráfego para o desenvolvimento dos seus principais componentes, especialmente no que diz respeito à definição e completa caracterização das variáveis lingüísticas de entrada e saída do sistema de controle e das regras que definem o relacionamento entre estas variáveis.

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

No âmbito da Engenharia de Transporte e Trânsito alguns trabalhos têm sido desenvolvidos com a utilização da lógica *fuzzy*. No trato das questões ligadas ao transporte e trânsito muitas decisões são tomadas baseadas na experiência e conhecimento dos engenheiros, motoristas e usuários, entre outros. Além disso, o uso de equações matemáticas para modelar o processo de tomada de decisão torna-se difícil em muitos problemas. Nestes casos, a utilização da lógica *fuzzy* e de seus conjuntos *fuzzy* como instrumento para a solução de problemas tem se mostrado bastante útil.

Os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos como conjuntos de objetos que, apesar de serem compostos por elementos que podem ser representados por números reais, não apresentam contornos bem definidos. Na lógica *fuzzy*, o estado da variável de entrada não muda abruptamente; ele perde gradualmente valor em um estado enquanto vai ganhando valor no próximo estado. Um conjunto *fuzzy* é representado através do grau de pertinência existente entre cada elemento e o conjunto, e sua definição deve refletir o conhecimento e a experiência dos especialistas no tipo de controle que será desenvolvido com a utilização da lógica *fuzzy*.

No que diz respeito à utilização da lógica *fuzzy* para o desenvolvimento de controladores semaforicos, a literatura ressalta a importância da definição dos conjuntos *fuzzy* e das regras *fuzzy* no desempenho destes controladores (Sayers *et al.*, 1998). No entanto, uma análise específica do impacto de diferentes definições dos conjuntos *fuzzy*, utilizados para uma

determinada base de regras, sobre o desempenho do controlador semafórico *fuzzy* não se encontra disponível na literatura. Do mesmo modo, um procedimento específico para a definição destes conjuntos também não foi ainda estabelecido.

1.3 JUSTIFICATIVA

A definição correta dos conjuntos *fuzzy* (elementos e função de pertinência) é essencial para o sucesso do desenvolvimento de qualquer aplicação da lógica *fuzzy*. No entanto, esta definição é baseada em critérios subjetivos de decisão (Lee, 1990).

Segundo o mesmo autor, para as regras *fuzzy* podem ser empregados quatro métodos de desenvolvimento, baseados em: experiência do operador, conhecimento do engenheiro de controle, modelagem *fuzzy* das ações de controle do operador e modelagem *fuzzy* do processo. Destes, os mais utilizados são os baseados na experiência do operador e no conhecimento do engenheiro de controle. As regras são deduzidas através das observações de um controlador humano, relacionando os dados de entrada e de saída.

No que diz respeito à caracterização dos conjuntos *fuzzy* a partir da experiência do controlador humano, a literatura sobre controladores semafóricos *fuzzy* não indica procedimentos que assegurem, simultaneamente, a devida representação desta experiência e dos objetivos específicos de cada situação de controle. Assim, a realização de um estudo nesta direção deverá trazer uma importante contribuição para o futuro desenvolvimento de controladores *fuzzy*.

1.4 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral desta pesquisa é desenvolver um procedimento para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos.

Como objetivos específicos tem-se:

- a) avaliar o impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores. São investigados os efeitos da mudança de definição dos valores extremos dos conjuntos *fuzzy* sobre os respectivos universos de discurso;

- b) definir um procedimento para aquisição da experiência e conhecimento dos especialistas na área de controle de tráfego para efeito da definição dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos.

1.5 HIPÓTESES

São duas as hipóteses a serem investigadas nesta pesquisa:

- a) diferentes conjuntos *fuzzy* de entrada impactam significativamente a operação dos controladores semafóricos *fuzzy*;
- b) é possível sistematizar um procedimento para a aquisição do conhecimento e experiência dos especialistas para a definição dos conjuntos *fuzzy* empregados nos controladores semafóricos *fuzzy*

1.6 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

Esta dissertação está dividida em 6 capítulos. O Capítulo 1 contém a apresentação do tema, da justificativa, dos objetivos e das hipóteses de estudo. A estrutura da dissertação é identificada a seguir contendo a apresentação dos conteúdos de cada capítulo.

Os Capítulos 2 e 3 são dedicados à revisão bibliográfica, sendo que o Capítulo 2 aborda o tema controladores semafóricos, buscando apresentar os conceitos necessários ao entendimento do trabalho. O Capítulo 3 tem como objetivo apresentar os controladores semafóricos *fuzzy*.

O Capítulo 4 é dedicado à avaliação do impacto dos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores semafóricos. É feita uma avaliação do efeito dos conjuntos *fuzzy* sobre a resposta do controlador e avaliação das diferentes respostas sobre a operação do tráfego através de um estudo de caso simulado.

No Capítulo 5 é apresentado o procedimento desenvolvido para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos: o instrumento empregado para a obtenção do conhecimento dos especialistas; a forma de tratar os dados coletados; e os testes realizados para a verificação da aplicabilidade prática do procedimento.

Finalmente, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, incluindo a análise relacionada à verificação das hipóteses propostas, limitações do estudo e recomendações para estudos futuros.

CAPÍTULO 2

CONTROLE DE TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES SEMAFORIZADAS

2.1 – INTRODUÇÃO

O controle do tráfego urbano pode ser feito pelo uso de semáforos, placas, pintura no pavimento, dentre outros dispositivos de controle, objetivando regular, advertir ou guiar o fluxo de tráfego. Se for justificado seu uso e dependendo da qualidade de sua programação, o semáforo pode ser um dos instrumentos mais eficazes para o controle do tráfego em uma interseção (Niittymäki, 1998).

O primeiro semáforo a utilizar luzes coloridas para o controle do fluxo de veículos foi instalado em Londres em 1868. Em 1913 James Hoge inventou o semáforo elétrico, sendo Cleveland, nos Estados Unidos, a primeira cidade a instalar esta invenção que tinha como objetivos prevenir acidentes, alternar o direito de passagem e minimizar a demora e o consumo de combustível. Em 1917 ocorreu a primeira instalação de semáforos interconectados. O sistema de progressão semafórico foi proposto em 1922 e os primeiros semáforos atuados pelo tráfego foram instalados em 1928.

2.2 – OPERAÇÃO SEMAFÓRICA

Quando os conflitos numa interseção atingem grande intensidade, comprometendo a tomada de decisão dos usuários da interseção quanto ao uso do espaço viário comum e, conseqüentemente, quanto à realização das manobras desejadas, tem-se geralmente o semáforo como dispositivo de controle mais adequado. Este, através de indicações luminosas transmitidas para motoristas e pedestres, alterna o direito de passagem de veículos e/ou pedestres em interseções de duas ou mais vias (DENATRAN, 1984).

Para que o semáforo possa atender de maneira satisfatória o tráfego que passa pela interseção, seu uso deve ser justificado e seus tempos devem estar bem dimensionados. O técnico deve avaliar cuidadosamente sua necessidade antes de implementá-lo, pois quando inadequadamente empregado pode fornecer os seguintes resultados:

- i. aumento da frequência de acidentes;
- ii. aumento do tempo perdido para atravessar a interseção;
- iii. desrespeito às indicações do semáforo; e
- iv. modificação das rotas, muitas vezes menos adequadas, na tentativa de evitar semáforos.

Alguns critérios baseados em propostas estrangeiras e sem nenhuma adaptação ou ajuste às nossas condições locais servem para análise da necessidade de instalação de um semáforo. Os julgamentos pessoais, fundamentados no conhecimento do local também são bastante importantes na tomada de decisões. Desde que justificado por critérios quantitativos e qualitativos, o semáforo atua de forma a minimizar os problemas de segurança e de fluidez do tráfego nas interseções.

De acordo com o DENATRAN (1984) os critérios para implantação de um semáforo são:

- volumes veiculares mínimos em todas as aproximações da interseção;
- interrupção do tráfego contínuo;
- volumes conflitantes em interseções de cinco ou mais aproximações;
- volumes mínimos de pedestres que cruzam a via principal;
- índice de acidentes e os diagramas de colisão;
- melhoria do sistema progressivo;
- controle de áreas congestionadas;
- combinação de critérios;
- situações locais específicas.

Vale lembrar que estes critérios não são absolutos, servindo apenas como guia para a implantação de semáforos.

Uma vez justificado e implementado, o semáforo pode ser programado para operar de forma isolada ou em rede com os semáforos das interseções adjacentes. Na operação isolada, o controle dos movimentos de tráfego baseia-se apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não sendo consideradas as eventuais influências exercidas pela operação de interseções sinalizadas adjacentes. Já na operação em rede há uma preocupação em operar os

semáforos de uma via de forma a dar continuidade de movimentos entre os semáforos das vias adjacentes (DENATRAN, 1984).

Dependendo das características dos conflitos que serão controlados, o controle semaforico pode ser efetuado de vários modos, dentre os quais estão o controle com semáforos de tempo fixo e o controle com os semáforos atuados pelo tráfego.

- Operação em tempo fixo

Controlar uma interseção em tempo fixo significa sinalizar o cruzamento, dando sempre o mesmo tempo de verde, amarelo e vermelho a cada corrente de tráfego que por ali passe, independentemente da variação do volume de veículos que chega nas aproximações da interseção. Pode, para atender a variação histórica dos volumes de tráfego ao longo do tempo, ser programado para operar com diversos planos semaforicos. O programador define o momento de entrada e saída de operação de cada plano. Neste tipo de operação o tempo de ciclo é constante e a duração e os instantes de mudança das fases são fixos em relação ao ciclo.

- Operação atuada – pode ser do tipo semi-atuada ou totalmente atuada:

- i. Na operação semi-atuada o semáforo fica sempre indicando verde para a via principal, até que um ou mais veículos sejam acusados pelo detector instalado na via secundária. O semáforo provê um intervalo de mudança e um tempo de verde para a via secundária, o qual dura até que todos os veículos sejam servidos, ou até que um valor máximo preestabelecido para a duração deste verde tenha sido atingido. Neste tipo de operação a duração dos tempos de ciclo e de verde podem variar de ciclo para ciclo, em resposta à demanda.
- ii. Na operação totalmente atuada há ajuste dos tempos semaforicos às variações de volume em tempo real. Utiliza-se de detectores de veículos em todas as aproximações e lógica de decisão. Em geral, tempos de verde máximos e mínimos são especificados para cada fase, assim como a seqüência de fases. Nesta forma de controle, tempos de ciclo e de verdes podem variar consideravelmente em resposta à demanda.

As variações da demanda em uma aproximação são significativas e apresentam um caráter aleatório (Mc Shane e Roess, 1990). O semáforo de tempo fixo não apresenta características para atender essa variação aleatória. O que norteia o semáforo atuado pelo tráfego é primordialmente esse atendimento.

Os semáforos visam assegurar, principalmente, dois atributos operacionais: fluidez e segurança. A fluidez pode ser definida como a facilidade com que é realizado o escoamento das correntes de tráfego. Este atributo assume especial importância em interseções, já que, nestes locais, observa-se a existência de fluxos conflitantes, o que gera a necessidade de interrupções temporárias de um ou mais destes fluxos, comprometendo a sua continuidade (Maiolino, 1992). Em interseções, os indicadores de desempenho mais comuns quanto à fluidez são:

1. Atraso – corresponde à diferença entre o tempo de percurso sob condições de fluxo livre e o tempo efetivamente gasto no percurso sob as condições existentes.
2. Fila – corresponde a uma seqüência de veículos solicitantes do direito de passagem na interseção. As principais medidas referentes à fila são o tempo médio de permanência na fila, o que corresponde a um atraso, e os seus comprimentos médio e máximo.

Já a segurança pode ser compreendida como a garantia de um escoamento isento de perigos para os usuários, sendo medida normalmente pelos índices de acidentes.

O semáforo apesar de organizar, disciplinar e gerenciar os movimentos em conflito no espaço viário, evidentemente contribui para eventuais atrasos e paradas de veículos e pedestres. É desejável um controle que produza o mínimo de atraso e máxima capacidade. Assim, torna-se essencial o uso de técnicas de controle semaforico que reduzam tais prejuízos, melhorando a fluidez e a segurança do tráfego (Gadelha *et al.*, 1999).

No trabalho desenvolvido, a ênfase será no controle semaforico atuado, em especial nos semáforos que utilizam o princípio da extensão, em particular nos controladores semaforicos *fuzzy*.

A Tabela 2.1 apresenta as vantagens e desvantagens de cada tipo de controlador, levando-se em conta o fator de adequabilidade a cada necessidade na hora da implantação do sistema semafórico (Reis, 2001).

Tabela 2.1 – Vantagens e desvantagens do controlador de tempo fixo e atuado pelo tráfego

	Controlador de Tempo Fixo	Controlador Atuado pelo tráfego
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Os tempos semafóricos são facilmente ajustados no campo. • Mais simples e mais barato que o outro modelo. • Em um sistema coordenado são, geralmente, eficientes, pois para a existência da progressão é necessário se ter tempos de verde e comprimento do ciclo constantes. • Podem operar com diferentes planos semafóricos durante um mesmo dia, dependendo do horário. 	<ul style="list-style-type: none"> • É ajustável à demanda e as flutuações do tráfego. • Geralmente reduzem o atraso e aumentam a capacidade da via. • Fornecem adequação às flutuações de tráfego.
Desvantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Não reconhecem, nem acomodam flutuações na demanda do tráfego. • Podem causar atrasos excessivos, tanto para veículos como para pedestres. 	<ul style="list-style-type: none"> • Possuem altos custos de implantação e manutenção. • Falta de garantia de progressão.

Fonte: Reis, 2001

2.3 – CONCEITOS

Em cruzamentos onde se justifica a implantação de semáforo é necessário que haja um bom dimensionamento dos planos semafóricos, garantindo fluidez, segurança e conforto. Isto significa desenvolver planos que efetuem, da melhor maneira possível, o controle de veículos na interseção, segundo um critério estabelecido, que pode ser: redução no atraso dos veículos, diminuição das filas formadas, aumento da segurança e da fluidez, entre outros.

Para isto, um adequado conhecimento dos diversos elementos que compõem a programação destes planos, como ciclo, fase e intervalo faz-se necessário.

- a) Ciclo - tempo total, em segundos, para a completa sequência de sinalização, numa interseção. É o tempo necessário para que todos os movimentos de tráfego que convergem para a interseção sejam servidos pelo menos uma vez;
- b) Fase - é a porção do ciclo semaforico durante a qual os movimentos que recebem o direito de passagem são constantes (Kell e Fullerton, 1991). Segundo o Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984), fase corresponde à sequência de indicação de cores verde, amarelo e vermelho aplicada a uma ou mais correntes de tráfego (movimento). O conceito de fase apresentado inicialmente aqui corresponde, no Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984), ao conceito de estágio.
- c) Intervalo - é a parte do ciclo durante a qual todas as indicações luminosas, tanto de veículos como de pedestres, são constantes.

2.4 - ESTRATÉGIA DE CONTROLE SEMAFÓRICO ATUADO

O controle atuado pelo tráfego é aquele no qual o tempo de verde de uma aproximação é influenciado pela detecção imediata de veículos, onde cada aproximação está sujeita aos tempos mínimo e máximo de verde e alguns estágios podem ser ignorados se não houver demanda em seu detector (TRB-HCM, 2000).

Segundo o Manual de Semáforos (DENATRAN, 1984), os chamados controladores por demanda de tráfego são mais complexos que os de tempo fixo por serem providos de detectores de veículos e lógica de decisão. Têm como finalidade básica dar tempo de verde a cada corrente de tráfego de acordo com a sua necessidade, ajustando-se dinamicamente às flutuações de tráfego que ocorrem no cruzamento. A atuação pode ser total, em todas as correntes de tráfego, ou parcial, onde apenas as correntes secundárias são atuadas.

O princípio de funcionamento do controlador atuado baseia-se na variação do tempo de verde associado a um determinado estágio, entre um valor mínimo e um valor máximo, programáveis no equipamento. O cálculo do tempo de verde será definido pelo controlador, em função das solicitações de demanda recebidas pelos detectores instalados no cruzamento.

Nestes tipos de controladores a duração dos estágios e do ciclo não é mais prefixada, mas sim continuamente ajustada em função do número de veículos detectados nas proximidades do cruzamento. Isto permite a eliminação da folga na programação semaforica necessária para acomodar flutuações nas condições de tráfego, em vista da possibilidade de ajustar os tempos de verde a cada ciclo, através da alocação de um tempo de verde igual ao necessário para escoar as filas, dentro de uma faixa de mínimo e máximo verde definida (Bonetti Jr e Pietrantonio, 1998).

A programação dos semáforos atuados pelo tráfego pode ser feita através do uso de diversas técnicas, como por exemplo, a otimização de uma função objetivo que represente o desempenho do tráfego sob determinado plano semaforico.

Um tipo de controle atuado utilizado é o chamado princípio da extensão, neste caso, um mínimo de tempo de verde, que corresponde ao tempo necessário para a passagem segura de um veículo ou para a travessia de pedestres no cruzamento, é dado inicialmente e, se necessário, este tempo é estendido. O princípio deste modelo é descarregar a fila formada, deixando que os veículos cruzem a interseção sem espera desnecessária. Um tempo de verde máximo é fixado com o intuito de não deixar os veículos na outra direção esperando por um tempo excessivo.

Uma outra técnica que está sendo proposta e testada com sucesso desde 1977 é o uso da lógica *fuzzy*, os chamados controladores semaforicos *fuzzy* (Niittymäki e Nevala, 2001; Jacques *et al.*, 2002b). O desempenho destes controladores, em comparação com o sistema tradicional de tempo fixo ou outras formas de controle atuado pelo tráfego, tem sido avaliado por diferentes autores, com resultados em geral positivos (Niittymäki e Nevala, 2001).

2.5 – CRITÉRIOS USUAIS PARA UTILIZAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS ATUADOS

Segundo revisão realizada por Bonetti Jr e Pietrantonio (1998), não existe uma definição clara sobre os contextos onde a atuação é um recurso útil e importante. No entanto, os autores apresentam uma visão genérica favorável ao uso da atuação e visões específicas que limitam este uso. Segundos eles, as vantagens e desvantagens da utilização de semáforos atuados são:

Vantagens:

- i. normalmente reduz atraso (desde que os parâmetros estejam ajustados);
- ii. adapta-se às flutuações do fluxo de tráfego;
- iii. normalmente aumenta a capacidade (pelo contínuo acréscimo de verde);
- iv. pode continuar operando em condições de baixos fluxos;
- v. especialmente efetivo em interseções de múltiplos estágios.

Desvantagens:

- i. custo de instalação elevado;
- ii. os detectores têm um custo de instalação significativo e requerem manutenção específica;
- iii. falta de garantia de progressão.

As desvantagens apresentadas pelo semáforo atuado são de ordem financeira e de manutenção, e não dizem respeito a sua eficácia em relação ao controle de tráfego em si.

Os semáforos atuados devem ser empregados em contextos onde a justificativa para a implantação de semáforos de tempos fixos não é satisfeita de forma ampla. A atuação deve ser utilizada para minorar os atrasos.

De acordo com este mesmo órgão, o uso de semáforos atuados deve acontecer nas seguintes situações:

- volume mínimo de pedestres – quando a travessia de pedestres ocorrer na via principal, devendo ser do tipo semi-atuado;
- travessias de escolares – o controle deverá ser normalmente atuado, sendo conveniente a existência de detecção em todas as aproximações;
- índice de acidentes – quando o semáforo for instalado somente por este critério deverá ser semi-atuado se fizer parte de um sistema coordenado e, normalmente, deverá ser totalmente atuado se for em interseções isoladas.

CAPÍTULO 3

CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

3.1 – INTRODUÇÃO

A utilização da lógica *fuzzy* como instrumento para a solução de problemas tem se mostrado bastante útil, especialmente quando esta solução deve refletir a experiência e o conhecimento de especialistas.

Os estudos presentes na literatura sobre a utilização da lógica *fuzzy* para o controle de tráfego em interseções isoladas indicam que a idéia básica dessa utilização está em modelar o controle baseado no conhecimento humano especializado, ao invés de modelar o processo em si. A lógica *fuzzy* tem a habilidade de entender instruções linguísticas e de gerar estratégias de controle baseadas, *a priori*, em comunicação verbal (Jacques, 2002a). O Apêndice A desta dissertação apresenta os princípios e elementos básicos relacionados à lógica *fuzzy*.

A utilização de controladores *fuzzy* para o comando do tráfego em interseções iniciou-se em 1977 com o trabalho de Pappis e Mamdani, a partir do qual diferentes controladores foram desenvolvidos e testados em comparação com controladores de tempo fixo e atuados pelo tráfego, com diferentes graus de sucesso (Niittymäki e Nevala, 2001).

Após este estudo inicial, outros foram realizados, podendo-se citar os trabalhos de Kim (1994), Pursula e Niittymäki (1996), Niittymäki (1998), Trabia *et al* (1999), Favilla *et al* (1993) e outros. Em muitos casos constatou-se melhoria no desempenho do controle em termos de medidas de desempenho, como atrasos e número de paradas, em relação ao tradicional modelo de controle atuado. Em situações de médio volume, os controladores *fuzzy* mostraram-se mais eficientes do que o modelo tradicional de controle atuado.

Favilla *et al.* (1993) mostraram que em diferentes situações de tráfego, dependendo do ajustamento das funções de pertinência, o desempenho do controlador *fuzzy* pode ser melhorado, e o intervalo de variação do volume de tráfego que permite o uso eficiente de controladores *fuzzy* pode ser ampliado.

Nakatsuyama *et al.* (1984) e Kim (1994) desenvolveram estudos com controladores *fuzzy* no funcionamento de interseções trabalhando em rede, onde obtiveram resultados positivos quanto à diminuição do tempo de espera dos veículos.

3.2 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DE UM CONTROLADOR FUZZY

O controlador semafórico *fuzzy* usa um tipo de estratégia de controle atuado pelo tráfego, baseado no princípio da extensão, diferindo em alguns aspectos da aplicação tradicional desse princípio. O número de parâmetros é bem menor do que no modelo tradicional de controle de veículo atuado e é de fácil compreensão, tornando o processo de controle mais adequado e próximo ao pensamento humano.

Outra diferença está no fato de que no controlador *fuzzy* o controle é feito com base nas condições do tráfego em ambas as direções do cruzamento, ou seja, tanto na direção que está sendo servida quanto na direção contrária, enquanto que no controlador tradicional operando sob o princípio da extensão, o controle é baseado somente na situação do tráfego que está sendo servido, a qual indica a necessidade da extensão ou finalização do tempo de verde.

O grande problema do princípio da extensão é que quando os veículos chegam na aproximação de forma espaçada, cada veículo que chega provoca um aumento da extensão do verde e, assim, a extensão total pode ficar muito grande (limitada apenas pelo tempo máximo de vermelho pré-especificado para a corrente de tráfego conflitante). O controlador *fuzzy* considera não só os veículos na aproximação que está recebendo indicação verde, como também a fila esperando no vermelho. Assim, a decisão de estender ou não o verde é baseada na situação global da interseção.

Os componentes principais de um controlador *fuzzy*, representados na Figura 3.1, são:

- interface para a definição e caracterização das variáveis lingüísticas associadas ao estado do processo (variáveis de entrada) e à ação de controle (variáveis de saída), denominada de interface de *fuzzification*;
- base de conhecimento;
- lógica para a tomada de decisão;

- interface para a geração da saída para a ação final de controle, chamada interface de *defuzzification*.

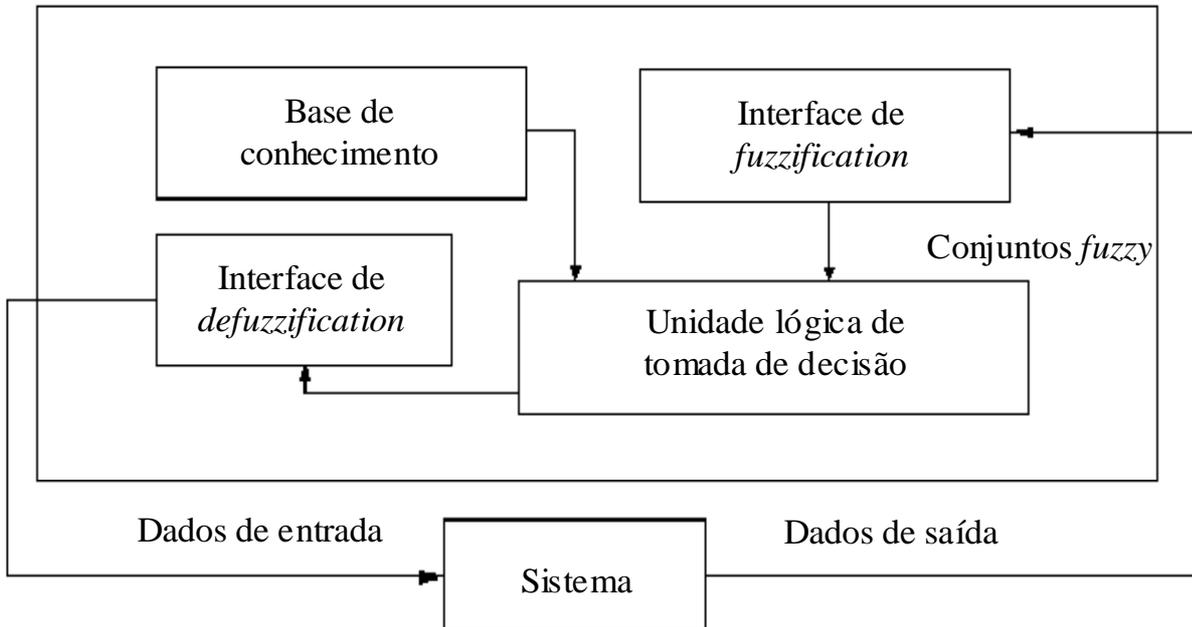


Figura 3.1 – Diagrama de um controlador *fuzzy* (Niitymäkki, 1998)

3.2.1 – Interface de *fuzzification*

A interface de *fuzzification* pode ser definida como o processo que faz a associação dos valores observados das variáveis de entrada nos universos de discurso correspondentes. Inclui uma avaliação do grau de pertinência do valor medido com relação aos diferentes conjuntos *fuzzy* da variável lingüística considerada. Estas definições, grau de pertinência, conjuntos *fuzzy* e variável lingüística, podem ser encontradas no Apêndice A desta dissertação. Tem como aspectos importantes a definição dos atributos do sistema (variáveis de entrada) e a função de pertinência.

As variáveis lingüísticas estão relacionadas ao estado do processo, caracterizado pelas variáveis de entrada, e à ação de controle, representada pelas variáveis de saída. Os valores lingüísticos destas variáveis correspondem a conjuntos *fuzzy*. Cada variável lingüística é associada a um universo de discurso, e a partição deste universo é feita de acordo com os valores que a variável pode assumir. Segundo Kim (1994), embora a partição do universo de

discurso relativo a uma variável lingüística em um certo número de níveis influa, substancialmente, na sensibilidade do controle, ela não é única.

Os conjuntos *fuzzy* descrevem termos das variáveis lingüísticas. O significado de cada termo é definido por uma função de pertinência. A função de pertinência é outro aspecto importante relacionado à interface de *fuzzification*. As funções de pertinência são usualmente construídas a partir do conhecimento e experiência de especialistas.

3.2.2 – Base de conhecimento

A base de conhecimento é o algoritmo *fuzzy* que, de acordo com Zadeh (1973), é “um conjunto ordenado de instruções *fuzzy* sobre cuja execução reside uma solução aproximada para um problema específico”. Estas instruções *fuzzy* caracterizam a política de controle e suas metas. Elas são expressas pelas regras *fuzzy* “Se-Então”.

Sugeno e Nishida (1985) indicam que a definição das regras *fuzzy* de controle pode ser efetuada com base na experiência do operador, no conhecimento do engenheiro de controle, na modelagem *fuzzy* das ações de controle do operador (processo de aprendizado) e na modelagem *fuzzy* do processo. Os dois primeiros métodos são heurísticos por natureza e, portanto, difíceis de serem generalizados. Apesar disto, são os métodos mais empregados na definição das regras *fuzzy* de controle para os controladores semafóricos.

3.2.3 – Lógica da tomada de decisão

Os controladores *fuzzy* têm sido desenvolvidos no contexto da inferência *fuzzy*, também conhecido como raciocínio aproximado, e de acordo com a regra de implicação *modus ponens* generalizada. Neste tipo de regra, o conseqüente é determinado a partir de um fato, entrada, e da premissa definida na parte “Se” da regra.

O comportamento do controlador *fuzzy* pode ser caracterizado pela agregação de diferentes regras *fuzzy*. Para se obter a função resultante é necessária a utilização de operadores lógicos. O desenvolvimento de controladores *fuzzy* deve ser precedido de uma avaliação de qual o melhor operador para cada caso. Estudo desenvolvido por Jacques *et al.* (2002c) indica que o uso de diferentes operadores impacta significativamente no desempenho de controladores

semafóricos *fuzzy*. Portanto, o desenvolvimento destes deve ser precedido de uma avaliação de qual o melhor operador para cada caso.

Na implementação da função de implicação *fuzzy* são, usualmente, empregadas a regra de operação definida por Mamdani, que emprega o operador “interseção”, e a regra de operação definida por Larsen, que emprega o operador “produto algébrico” (Ver Apêndice A). Entretanto, outras regras de operação foram propostas e analisadas para aplicação em controladores *fuzzy* (Mizumoto e Zimmerman, 1982).

3.2.4 – Processo de *defuzzification*

Depois que a variável de entrada do controlador *fuzzy* foi processada pelo algoritmo de controle, o resultado é uma variável de saída *fuzzy*. O processo de *defuzzification* consiste em selecionar um valor numérico específico que represente o resultado da variável de saída *fuzzy*, produzido pelo conjunto de regras *fuzzy*. A escolha de um método de *defuzzification* pode ter um impacto significativo na velocidade e exatidão de um controlador *fuzzy* (Jacques *et al.*, 2002c).

Os métodos de *defuzzification* frequentemente utilizados são: Critério máximo; Método do centro de gravidade; Bissetor da área; Média dos máximos; Mínimo do máximo. (Ver Apêndice A)

Braae e Rutherford (1978) apresentam alguns métodos de *defuzzification*, juntamente com o procedimento empregado para gerar o conjunto *fuzzy* correspondente à saída do conjunto de regras de decisão. Estes métodos são referidos como composição e interpretação max-min, composição max-min com interpretação probabilística, e composição e interpretação probabilísticas.

3.3 – MODELOS DE CONTROLADORES FUZZY PARA O CONTROLE DE INTERSEÇÕES

A partir do trabalho iniciado por Pappis e Mamdani (1977), diversos trabalhos têm procurado desenvolver controladores semafóricos *fuzzy*, principalmente para o controle de interseções isoladas.

Estudo realizado por Jacques *et al.* (2002a) verificou e analisou os aspectos teóricos da lógica de tomada de decisão de alguns controladores. Foi verificado que os operadores definidos no trabalho inicial de Pappis e Mamdani (1977) têm sido utilizados nos outros controladores e que na maioria dos controladores estudados, os conjuntos *fuzzy* de entrada e saída e as regras para operação dos controladores foram projetados exclusivamente com base no conhecimento e experiência dos especialistas. A seguir é apresentado um detalhamento de alguns destes controladores encontrados na literatura. A Tabela 3.1 apresenta uma síntese das principais características dos mesmos.

3.3.1 – Controlador *fuzzy* de Pappis e Mamdani

Este controlador foi projetado para controlar uma interseção de duas vias de sentido único, com duas faixas de trânsito, não permitindo movimentos de conversão. Considera que as chegadas dos veículos na interseção ocorrem de maneira aleatória e são distribuídas uniformemente. O ciclo é dividido em dois períodos: um chamado de “vermelho efetivo” e o outro de “verde efetivo”. O tempo total perdido por ciclo é igual a 10 segundos. Os autores apresentam um modelo para o cálculo do atraso médio por veículo.

Trata-se de um controlador bifásico (aqui, fase é usada como sinônimo de estágio) que é ativado a cada 10 segundos durante cada período de fase verde. A primeira intervenção ocorre após os primeiros 07 segundos de verde (verde mínimo). O sistema fornece um máximo de 05 intervenções, cada intervenção podendo variar de 01 a 10 segundos. Entretanto, se uma intervenção foi calculada para durar menos que 10 segundos, nenhuma outra interferência pode ser feita até o seu término.

O tempo de verde máximo possível para uma aproximação, neste modelo de controlador, é de 57 segundos. O valor destas extensões é definido de acordo com as informações obtidas dos detectores, tratando-se de um processo de decisão dependente do tempo. A distância entre o caminho percorrido pelos veículos e a linha de retenção é suficiente para que o controlador seja informado sobre a chegada de veículos na interseção durante os próximos 11,5 segundos.

Este controlador apresenta como variáveis *fuzzy* de entrada o número de veículos que chega na aproximação que está sendo servida e o número de veículos que está na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. Foram considerados para a variável

chegada cinco conjuntos *fuzzy* diferentes, variando desde “nenhum veículo” chegando até uma “quantidade excessiva de veículos”. Para a variável fila também foram considerados seis conjuntos *fuzzy* definidos entre “muito pequena” e “muito longa”.

Como variáveis de saída foram definidas o tempo decorrido após o final do período de verde e a extensão dada ao tempo de verde corrente. Foram considerados para a variável tempo cinco conjuntos *fuzzy* diferentes, variando de “muito curto” a “muito longo”. Para a variável extensão também foram definidos cinco conjuntos *fuzzy*, desde “muito curta” a “muito longa”.

As funções de pertinência para todas as variáveis *fuzzy* definidas neste controlador apresentam formato triangular, ou próximas a um triângulo. Neste modelo adotou-se como processo de *defuzzification* o método do critério máximo.

3.3.2 – Controlador *fuzzy* de Jarkko Niittymäki

Este modelo de controlador foi desenvolvido para o controle de duas fases, em interseções isoladas de duas vias de sentido único, podendo também ser utilizado em interseção isolada de duas vias de sentido duplo, não havendo restrições quanto ao número de faixas por aproximação.

Neste modelo dois detectores são instalados por cada faixa de aproximação: o primeiro localiza-se a 100 metros a montante da faixa de retenção e o segundo localiza-se na faixa de retenção. A área situada entre os dois detectores é denominada de zona de aproximação. Através destes é possível saber o número de veículos que está se aproximando da linha de retenção. Adota-se como tempo de verde mínimo 5 segundos e o sistema prevê um máximo de cinco intervenções, ocorrendo a primeira após o tempo mínimo de verde.

Este controlador apresenta como variáveis *fuzzy* de entrada o número de veículos que chega na aproximação que está sendo servida e o número de veículos que está na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. Foram considerados para a variável chegada quatro conjuntos *fuzzy* diferentes, variando desde “nenhum veículo” até “muitos veículos”. Para a variável fila também foram considerados quatro conjuntos *fuzzy* definidos no intervalo que vai desde “pequena” até “qualquer”. Como variável de saída é utilizada a

extensão que deve ser fornecida ao tempo de verde, para a qual foram considerados três conjuntos *fuzzy*: “pequena”, “média” e “longa”.

As funções de pertinência para todas as variáveis *fuzzy* definidas neste controlador apresentam formato triangular, ou próximas a um triângulo. As regras foram definidas baseadas na experiência de especialistas da área, e são empregadas para a definição de cada intervenção. A seleção do valor da variável de saída pode ser definida por um dos seguintes métodos de *defuzzification*: método do critério máximo, método do centro de gravidade e média dos valores máximos.

3.3.3 – Controlador *fuzzy* de José Favilla Jr *et al.*

Foi considerada, neste modelo, uma única interseção de duas vias principais, uma com duas e a outra com três faixas de fluxo. Há uma seqüência pré-definida de fases, embora uma fase possa ser saltada se não houver a presença de nenhum veículo na aproximação. O tempo de verde corrente pode ser aumentado por intervenções que variam de 0 a 10 segundos.

O controlador fornece extensões do tempo de verde até que as condições do tráfego indiquem a necessidade de mudança de fase ou que o tempo máximo de verde para a fase correspondente seja alcançado. O detector instalado ao longo da via permite que o controlador seja informado sobre a chegada de veículos no cruzamento durante os próximos 10 segundos.

Neste modelo, o controlador possui um estimador que calcula a velocidade dos veículos e estima o momento destes cruzarem a interseção, gerando as variáveis de entrada para o algoritmo *fuzzy*. Apresenta como variáveis *fuzzy* de entrada o número de veículos que chega na aproximação que está recebendo o tempo de verde e o número de veículos que está na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. Foram considerados para a variável chegada e para a variável fila quatro conjuntos *fuzzy* diferentes. Como variável de saída é utilizada a extensão que deve ser fornecida ao tempo de verde, tendo sido considerados quatro conjuntos *fuzzy*.

As funções de pertinência para todas as variáveis *fuzzy* definidas apresentam formato triangular. Foram definidas 16 regras que tiveram como base a experiência de especialistas da área, a modelagem *fuzzy* do processo e o conhecimento do engenheiro de controle.

A seleção do valor da variável de saída pode ser definida pelo método de *defuzzification* centro da área.

Tabela 3.1 – Principais características dos controladores semafóricos *fuzzy* encontrados na literatura

Controlador <i>fuzzy</i>	Variáveis linguísticas	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Formato das funções de pertinência
Pappis e Mamdani	<ul style="list-style-type: none"> • número de veículos que chega na aproximação que está sendo servida. • número de veículos na fila da aproximação que está recebendo o tempo de vermelho. • tempo decorrido após o final do período de verde. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • foram considerados cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • foram considerados seis conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • foram considerados cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável tempo e extensão. • foram considerados cinco conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão. 	<ul style="list-style-type: none"> • triangular • triangular • triangular • triangular
Jarkko Niittymäki	<ul style="list-style-type: none"> • número de veículos que chega na aproximação que está sendo servida. • número de veículos na fila da aproximação que está recebendo tempo de vermelho. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • foram considerados quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • foram considerados quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • foram consideradas três conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão. 	<ul style="list-style-type: none"> • triangular • triangular • triangular
José Favilla Jr. et al.	<ul style="list-style-type: none"> • número de veículos que chega na aproximação que está sendo servida. • número de veículos na fila da aproximação que está recebendo tempo de vermelho. • extensão dada ao tempo de verde corrente. 	<ul style="list-style-type: none"> • foram considerados quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável chegada. • foram considerados quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável fila. • foram considerados quatro conjuntos <i>fuzzy</i> para a variável extensão. 	<ul style="list-style-type: none"> • triangular • triangular • triangular

3.4 – MODELAGEM DE CONTROLADOR *FUZZY* ATRAVÉS DO SOFTWARE MATLAB

A caixa de ferramenta que opera a lógica *fuzzy* no MATLAB (FLT-M) permite a construção dos componentes de um controlador que trabalha com a lógica *fuzzy*. Uma vez implementados

estes componentes os resultados obtidos podem ser facilmente analisados através de gráficos gerados pelo FLT-M.

As cinco partes do sistema de inferência pela lógica *fuzzy* no FLT-M são: processo de *fuzzification* das variáveis de entrada, aplicação dos operadores *fuzzy* (“E” e “OU”) na parte antecedente da regra, implicação da condição sobre a consequência da regra, agregação das consequências através das regras e o processo de *defuzzification* (Jang e Gulley, 1995). Nas seções seguintes serão apresentadas as características destas etapas bem como os tipos de controladores disponíveis no FLT-M. Uma síntese dos principais componentes da caixa de ferramenta do Matlab referente à Lógica *fuzzy* (FLT-M) é apresentada na Tabela 3.2. O detalhamento destes componentes é apresentado nas subseções a seguir.

3.4.1 – Tipos de controladores

Antes da definição das cinco partes do sistema de inferência pela lógica *fuzzy*, o usuário deverá indicar qual tipo de controlador que será utilizado: Mamdani ou Sugeno. A diferença básica entre estes tipos de controladores está na maneira como as variáveis de saída, a parte consequente das regras, são determinadas. No controlador tipo Mamdani estas são conjuntos *fuzzy* e no controlador tipo Sugeno são valores numéricos. As principais características são expostas a seguir.

a. Controlador tipo Mamdani

Este modelo foi proposto em 1975 por Ebrahim Mamdani para realizar o controle de uma máquina a vapor, usando como base a teoria dos conjuntos *fuzzy*, baseado em experiências humanas. As principais características deste modelo são as seguintes:

- o processo começa com a descrição das variáveis lingüísticas que serão as variáveis de entrada das regras *fuzzy*;
- os termos das variáveis lingüísticas são descritos pelas funções de pertinência;
- as regras conectam as variáveis de entrada com as variáveis de saída;
- as variáveis de saída também são variáveis lingüísticas, onde os termos são descritos pelas funções de pertinência;
- a essência computacional pode ser descrita em um processo de quatro etapas:

1. determinação do grau de pertinência da variável de saída da parte condicionante de cada regra;
2. cálculo das conseqüências de cada regra;
3. agregação das conseqüências das regras e definição do conjunto *fuzzy* “ação de controle”;
4. uso de um processo de *defuzzification* adequado;

b. Controlador tipo Sugeno

Este modelo foi introduzido em 1985 com o objetivo de introduzir na modelagem *fuzzy* alguns conceitos da matemática tradicional. É similar ao modelo proposto por Mamdani em muitos aspectos. As principais características deste modelo são as seguintes:

- as variáveis de entrada são representadas por conjuntos *fuzzy*, tal qual no controlador Mamdani;
- as variáveis de saída das regras *fuzzy* são valores numéricos (na verdade podem ser definidos como pertencentes a conjuntos *fuzzy singleton*), que são função das variáveis de entrada;
- os resultados da regra são agregados como somas ponderadas das ações de controle correspondentes a cada regra, onde o peso de cada regra é o grau de pertinência calculado para o antecedente da regra;
- o processo de *defuzzification* é, portanto, desnecessário.

3.4.2 – Processo de *fuzzification* das variáveis de entrada

Nesta etapa, as funções de pertinência para as variáveis de entrada são utilizadas para determinar como estes valores se relacionam com os conjuntos *fuzzy*. Os conjuntos *fuzzy* descrevem termos das variáveis lingüísticas. O significado de cada termo é definido por uma função de pertinência. As funções de pertinência são usualmente construídas a partir do conhecimento e experiência de especialistas.

O FLT-M inclui a construção de 11 tipos de funções de pertinência. Estas são construídas a partir de diversas funções básicas: funções lineares, distribuição de Gauss, curva sigmoideal e polinômios. São elas:

1. Diferença entre duas funções sigmoidais (*dsigmf*);
2. Curva gaussiana composta (*gauss2mf*);
3. Curva gaussiana simples (*gaussmf*);
4. Curva sino generalizada (*gbellmf*);
5. Em formato pi (*pimf*);
6. Em formato s (*smf*);
7. Produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*);
8. Trapezoidal (*trapmf*);
9. Triangular (*trimf*);
10. Sigmoidal (*sigmf*);
11. Formato z (*zmf*)

O FLT-M permite, ainda, que o usuário crie sua própria função de pertinência caso não a encontre na lista disponível. Para o controlador do tipo Sugeno as funções de pertinência para as variáveis de entrada são as mesmas apresentadas acima. No entanto, para as variáveis de saída, somente dois tipos de função de pertinência podem ser adotados. São eles:

1. Constante;
2. Função linear

3.4.3 – Aplicação dos operadores *fuzzy* (“E” e “OU”) na parte condicionante da regra

Após a definição das variáveis linguísticas de entrada e de saída e dos conjuntos *fuzzy*, o usuário deverá fornecer as regras *fuzzy*, baseadas na experiência de especialistas, que são expressas como regras do tipo “Se-Então”, onde o “Se” é chamado de parte antecedente da regra e o “Então” de parte conseqüente da regra (Ver Apêndice A).

Quando a parte antecedente da regra é composta por mais de uma condição, o operador *fuzzy* é aplicado. A utilização deste operador resulta na determinação do grau de pertinência global do antecedente a ser considerado pela função de implicação com a variável de saída. No FLT-M, dois diferentes tipos de operadores podem ser encontrados: o “E” e “OU”.

Na implementação do conector “E”, o FLT-M disponibiliza a operação de “interseção” (*min*) e o “produto algébrico” (*prod*). No caso do “OU” disponibiliza a operação de “união” (*max*) e

a “soma algébrica” (*probor*). Para os dois tipos de conectores o usuário poderá definir outros tipos de operações.

3.4.4 – Implicação da condição da regra *fuzzy* sobre o conseqüente da regra

É definido como o processo que dá forma à parte conseqüente da regra *fuzzy*, baseado na condição da regra. Significa o uso da função de implicação *fuzzy*. No que se refere à implementação desta função, o FLT-M utiliza a regra de operação definida por Mamdani (*Rc*), que emprega o operador “interseção”, ou “mínimo” (*min*), e a regra de operação definida por Larsen (*Rp*), que emprega o operador “produto algébrico” (*prod*). Estas regras são apresentadas no Apêndice A.

O usuário poderá definir outros tipos de funções de implicação. Cada regra possui um peso específico, definido dentro do intervalo de 0 a 1, que é aplicado na premissa da regra.

3.4.5 – Agregação das conseqüências produzidas pelas regras

Esta operação significa a definição de como o conectivo “também” será implementado. A entrada do processo de agregação é formada pelos conjuntos *fuzzy* de saída de cada regra, definidos pela aplicação das respectivas funções de implicação. A saída corresponde então a um conjunto *fuzzy* para cada variável de saída (conjuntos *fuzzy* das ações de controle), formado por todos os possíveis valores de controle e seus respectivos graus de pertinência.

Os operadores utilizados no processo de agregação, para implementação do conectivo “também”, são: união (*max*), soma algébrica (*probor*) e a soma de cada regra de saída (*sum*). O usuário poderá definir outro tipo de operador. Para o controlador do tipo Sugeno não há a opção do processo de agregação já que, conforme visto anteriormente, o resultado da agregação, que já é o próprio valor numérico da variável de controle, é obtido pela média ponderada dos valores da variável de controle produzidas por cada uma das regras.

3.4.6 – Processo de *defuzzification*

No FLT-M são encontrados cinco métodos de *defuzzification*. São eles:

1. Critério máximo (*LOM*);

2. Método do centro de gravidade (*COG*);
3. Bissetor da área;
4. Média dos valores máximos (*MOM*);
5. Mínimo do máximo (*SOM*).

Sendo necessário, o usuário poderá definir outro método de *defuzzification*.

Tabela 3.2 – Principais componentes do FLT-M

Tipo de controlador	Função de pertinência		Operador <i>fuzzy</i>		Função de implicação	Agregação	Método de defuzzification
	Variáveis de entrada	Variáveis de saída	E	OU			
Mamdani	<i>dsigmf</i>	<i>dsigmf</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i> <i>prod</i> (d.u.)	<i>max</i> <i>probor</i> <i>sum</i> (d.u.)	<i>COG</i> <i>Bissetor da área</i> <i>MOM</i> <i>LOM</i> <i>SOM</i> (d.u.)
	<i>gauss2mf</i>	<i>gauss2mf</i>	<i>prod</i>	<i>probor</i>			
	<i>gaussmf</i>	<i>gaussmf</i>	(d.u.)	(d.u.)			
	<i>gbellmf</i>	<i>gbellmf</i>					
	<i>pimf</i>	<i>pimf</i>					
	<i>psimf</i>	<i>psimf</i>					
	<i>smf</i>	<i>smf</i>					
	<i>sigmf</i>	<i>sigmf</i>					
	<i>trapmf</i>	<i>trapmf</i>					
	<i>trimf</i>	<i>trimf</i>					
	<i>zmf</i>	<i>zmf</i>					
	(d.u.)	(d.u.)					
	Sugeno	<i>dsigmf</i>	Constante Linear	<i>min</i>			
<i>gauss2mf</i>		<i>prod</i>		<i>probor</i>			
<i>gaussmf</i>		(d.u.)		(d.u.)			
<i>gbellmf</i>							
<i>pimf</i>							
<i>psimf</i>							
<i>smf</i>							
<i>sigmf</i>							
<i>trapmf</i>							
<i>trimf</i>							
<i>zmf</i>							
(d.u.)							

Notação: (d.u.) - definido pelo usuário (n.d.) - não disponível

Fonte: Jacques, 2002c.

CAPÍTULO 4

IMPACTO DOS CONJUNTOS *FUZZY* SOBRE O DESEMPENHO DOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

4.1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma análise específica do impacto de diferentes definições dos conjuntos *fuzzy*, utilizados para uma mesma base de regras, sobre a resposta do controlador semafórico *fuzzy*. Serão investigados os efeitos da mudança de definição dos valores extremos dos conjuntos *fuzzy* sobre os respectivos universos de discurso. O controlador *fuzzy* básico utilizado neste estudo possui características, variáveis lingüísticas e conjunto de regras, entre outras, similares aos descritos na literatura, conforme estudo já realizado por Jacques *et al* (2002a). A avaliação do impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores semafóricos foi realizada através de um experimento controlado, garantindo que as diferenças observadas se devem exclusivamente às alterações testadas.

A superfície de resposta do controlador foi calculada utilizando-se o *software* MATLAB (Jang e Gulley, 1995), contendo os resultados do processo de tomada de decisão *fuzzy*, que são os valores da extensão do tempo de verde para a aproximação que está sendo servida, calculados a partir das condições observadas das variáveis de entrada.

Visando a atender este propósito, este estudo foi composto pelas seguintes etapas:

1. desenvolvimento do modelo da interseção básica de estudo;
2. caracterização e implementação do controlador *fuzzy* básico no MATLAB;
3. definição das alterações nos conjuntos *fuzzy* iniciais para serem testadas e geração das planilhas de controle referentes a cada uma dessas alterações;
4. simulação do tráfego sob cada planilha para as diferentes condições de operação e volume, com o programa HUTSIM (Kosonen, 1999);
5. avaliação dos resultados referentes às diferentes simulações.

Cada uma dessas etapas é apresentada nas próximas seções deste capítulo.

4.2 – DESENVOLVIMENTO DO MODELO DA INTERSEÇÃO BÁSICA DE ESTUDO

A interseção básica conduzida neste estudo caracteriza-se por uma interseção de duas vias de sentido único, sendo uma via principal e uma via secundária, operando sob três diferentes níveis de volume de tráfego, como mostrado na Tabela 4.1. Cada aproximação possui duas faixas de trânsito com 600 metros de comprimento cada. Não são permitidos movimentos de conversão. Foram considerados apenas veículos de passeio na composição do tráfego.

Tabela 4.1 – Diferentes níveis de volume de tráfego

Nível de volume	Vias com diferentes volumes (veic./h)	
	Via principal (1)	Via secundária (2)
Baixo (B)	600	200
Médio (M)	1200	400
Alto (A)	1600	600

Esses valores de volumes baixo, médio e alto foram arbitrados considerando-se uma estimativa preliminar de tempo de ciclo e tempo de verde de modo a obter razão Volume/Capacidade nos intervalos abaixo:

- Volume baixo – $V/C < 0,5$
- Volume médio – $0,5 < V/C < 0,8$
- Volume alto – $V/C > 0,8$

4.3 – CARACTERIZAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY BÁSICO NO MATLAB

Esta etapa do estudo consiste em caracterizar o controlador *fuzzy* utilizado, ou seja, definição das variáveis linguísticas, dos valores dos conjuntos *fuzzy*, da base de regras utilizadas, do tipo de função de pertinência utilizada, dos operadores utilizados para implementação dos conectores e do método de *defuzzification* adotado, para implementação das suas características no MATLAB.

As variáveis linguísticas definidas para este estudo foram:

a) variáveis de entrada

- Fila – corresponde ao número de veículos da aproximação que está recebendo tempo de vermelho, ou seja, no sentido que não está sendo servido no momento. Foram considerados um total de 21 situações, com a fila variando de 0 a 20 veículos.
- Chegada – corresponde ao número de veículos que chega na aproximação que está recebendo tempo de verde, ou seja, no sentido que está sendo servido no momento. Foram considerados um total de 21 situações, com as chegadas variando de 0 a 21 veículos.

b) variável de saída

- Extensão – extensão dada ao tempo de verde corrente, isto é, a extensão do tempo de verde que deve ser fornecida à aproximação que está sendo servida.

Estas variáveis são as mais utilizadas no desenvolvimento de controladores semafóricos *fuzzy*, conforme pode ser verificado no Capítulo 3.

Baseado em estudo anteriormente realizado por Jacques *et al.* (2002a), foram adotados para as variáveis linguísticas relacionadas acima os seguintes valores possíveis:

- i. Fila: pequena, média, longa e qualquer;
- ii. Chegada: zero, pouca, média, muita e qualquer;
- iii. Extensão: zero, curta, média e longa.

A cada valor corresponde um conjunto *fuzzy*, com as características mostradas nas figuras 4.1, 4.2 e 4.3.

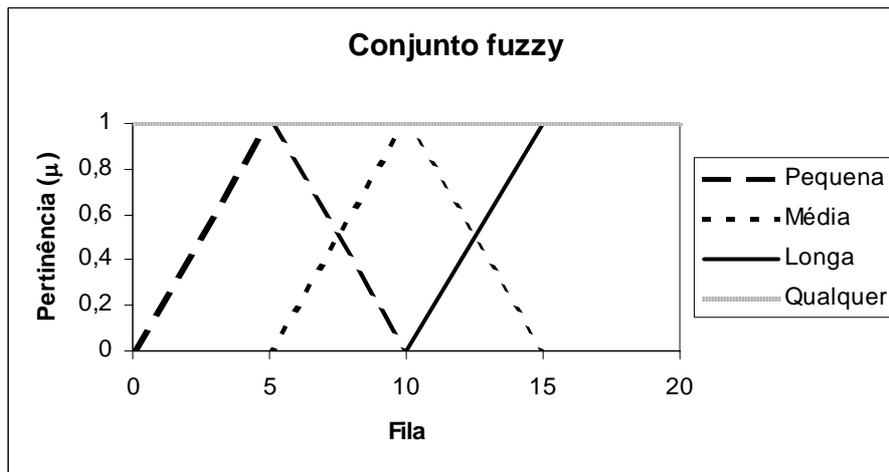


Figura 4.1 – Conjuntos *fuzzy* para a variável linguística fila

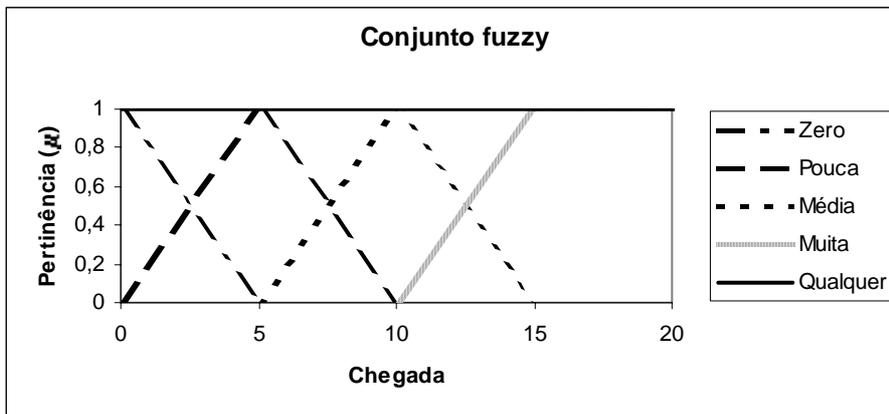


Figura 4.2 – Conjuntos *fuzzy* para a variável linguística chegada

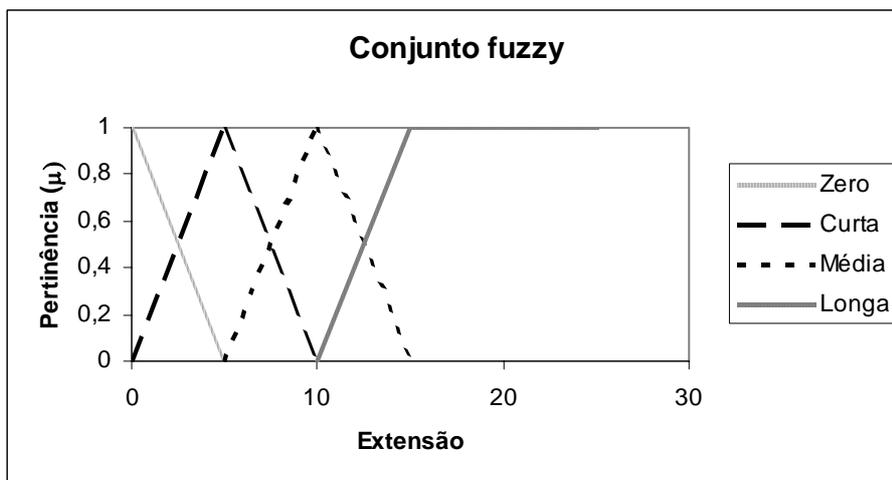


Figura 4.3 – Conjuntos *fuzzy* para a variável linguística extensão

Pode-se verificar a adoção dos seguintes intervalos para cada valor de variável:

- i. Para fila: pequena (variando de 0 a 10 veículos), média (variando de 5 a 15 veículos), longa (variando de 10 a 20 veículos) e qualquer (variando de 0 a 20 veículos);
- ii. Para chegada: zero (variando de 0 a 5 veículos), pouca (variando de 0 a 10 veículos), média (variando de 5 a 15 veículos), muita (variando de 10 a 20 veículos) e qualquer (variando de 0 a 20 veículos);
- iii. Para extensão: zero (variando de 0 a 5 segundos), curta (variando de 0 a 10 segundos), média (variando de 5 a 15 segundos) e longa (variando de 10 a 20 segundos).

A forma das funções de pertinência utilizada para as variáveis foi:

Variável Fila: Triangular: “pequena” e “média”

Trapezoidal: “longa” e “qualquer”

Variável Chegada: Triangular: “zero”, “pouca” e “média”

Trapezoidal: “muitas” e “qualquer”

Variável Extensão: Triangular: “zero”, “curta” e “média”

Trapezoidal: “longa”

O conjunto de regras *fuzzy* definido neste estudo foi baseado na experiência de especialistas, constituindo-se regras do tipo “Se-Então”, utilizando-se o operador interseção, ou mínimo, na avaliação destas. A partir da Tabela 4.2, podemos escrever regras do tipo:

1. *SE* fila pequena *E* chegada média *ENTÃO* extensão média;
2. *SE* fila média *E* chegada muita *ENTÃO* extensão média;
3. *SE* fila longa *E* chegada muita *ENTÃO* extensão média.

Tabela 4.2 – Regras *fuzzy* implementadas

Regra	SE Fila	E Chegada	ENTÃO Extensão
1	Qualquer	Zero	Zero
2	Pequena	Pouca	Curta
3	Média	Pouca	Zero
4	Longa	Pouca	Zero
5	Pequena	Média	Média
6	Média	Média	Curta
7	Longa	Média	Curta
8	Pequena	Muita	Longa
9	Média	Muita	Média
10	Longa	Muita	Média
11	<i>None</i>	Pouca	Curta
12	<i>None</i>	Média	Média
13	<i>None</i>	Muita	Longa

O método de *defuzzification* utilizado foi o método do centro de gravidade (COG). As regras 11, 12 e 13 foram incluídas para garantir que a superfície no COG não tenha grande descontinuidade. Foram utilizados também os seguintes elementos na implementação do controlador *fuzzy* estudado no MATLAB: os conectivos “E” e “TAMBÉM” com os operadores mínimo e máximo, respectivamente. A função de implicação adotada é a regra de operação mínima de Mamdani.

4.4 – DEFINIÇÃO DAS ALTERAÇÕES NOS CONJUNTOS *FUZZY* INICIAIS PARA SEREM TESTADAS

Definidas as características iniciais do controlador, foram feitas modificações nos valores extremos dos conjuntos *fuzzy* iniciais. Apresentamos 7 casos diferentes para análise e posterior comparação. São eles:

- Caso 01 – situação inicial, correspondente ao caso básico apresentado na seção 4.3;
- Caso 02 – redução de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para a variável fila;
- Caso 03 – redução de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para a variável chegada;
- Caso 04 – redução de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada;
- Caso 05 – Acréscimo de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para a variável fila;

- Caso 06 – Acréscimo de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para a variável chegada;
- Caso 07 – Acréscimo de 20% nos valores limites dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada;

Para todos os casos estudados os valores dos conjuntos *fuzzy* associados à variável extensão foram mantidos constantes, como forma de facilitar a análise pretendida. Um outro aspecto que levou a essa decisão foi o fato de que, por servir diretamente de base para a formação do conjunto de consequência das regras *fuzzy* “C”, esses conjuntos, se alterados, deveriam ter impacto maior sobre a ação de controle do que os associados às variáveis de entrada. Isto é, partiu-se da premissa de que se as alterações nos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada impactarem significativamente o desempenho do controlador, então modificações nos conjuntos *fuzzy* associados à variável de saída também produzirão impactos significativos.

O Caso 01 foi considerado a situação inicial, o caso básico descrito anteriormente. As demais características do controlador foram mantidas constantes para todas as situações. Definidas as características do controlador em todos os casos, utilizou-se o *software* MATLAB para o cálculo da superfície de resposta do controlador a partir do qual são obtidos os valores numéricos correspondentes à extensão do tempo de verde para a aproximação que está sendo servida para cada caso possível das variáveis de entrada. As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 mostram os valores correspondentes em cada caso estudado, de cada conjunto *fuzzy*, definidos para as três variáveis:

Tabela 4.3 – Limites dos conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “fila” nos 7 casos estudados

Situação	Variável Fila - limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>			
	Pequena	Média	Longa	Qualquer
Caso 01	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 02	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 03	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 04	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 05	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 06	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 07	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]

Tabela 4.4 – Limites dos conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “chegada” nos 7 casos estudados

Situação	Variável Chegada – limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>				
	Zero	Pequena	Média	Longa	Qualquer
Caso 01	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 02	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 03	[0 0 4]	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 04	[0 0 4]	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 05	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 06	[0 0 6]	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]
Caso 07	[0 0 6]	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]

Tabela 4.5 – Limites dos conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “extensão” nos 7 casos estudados

Situação	Variável extensão – limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>			
	Zero	Curta	Média	Longa
Todos os casos	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]

Além dos valores extremos dos conjuntos *fuzzy*, outras características poderiam também ter sido modificadas, como por exemplo, a forma da função de pertinência. A alteração de qualquer uma das características do controlador *fuzzy*, mantendo-se as demais constantes permite a geração de uma planilha de controle associada à modificação realizada.

Feitas as modificações mencionadas, foram geradas no MATLAB as planilhas e superfícies de controle referentes aos 07 casos estudados. A Figura 4.4 e a Tabela 4.6 mostram, respectivamente, a superfície e a planilha de controle relacionadas ao Caso 01. As planilhas e superfícies relacionadas aos demais casos são apresentadas no Apêndice B.

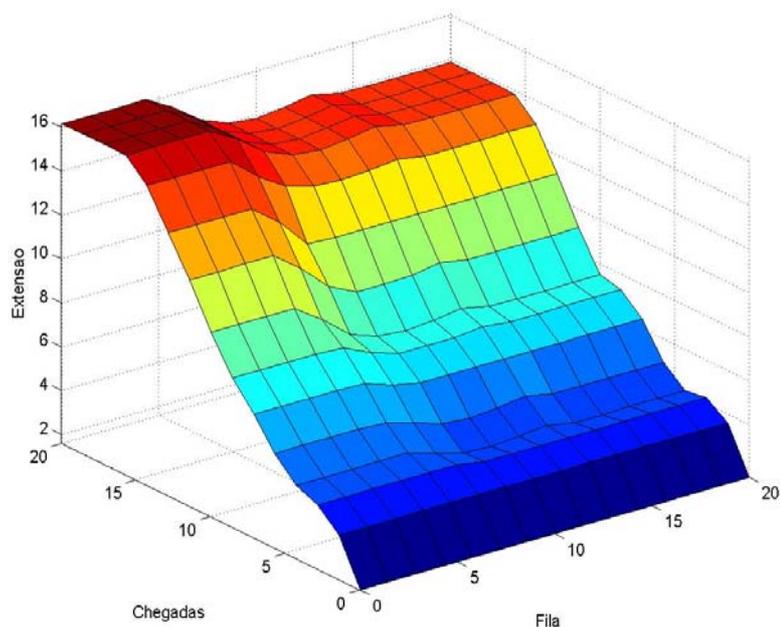
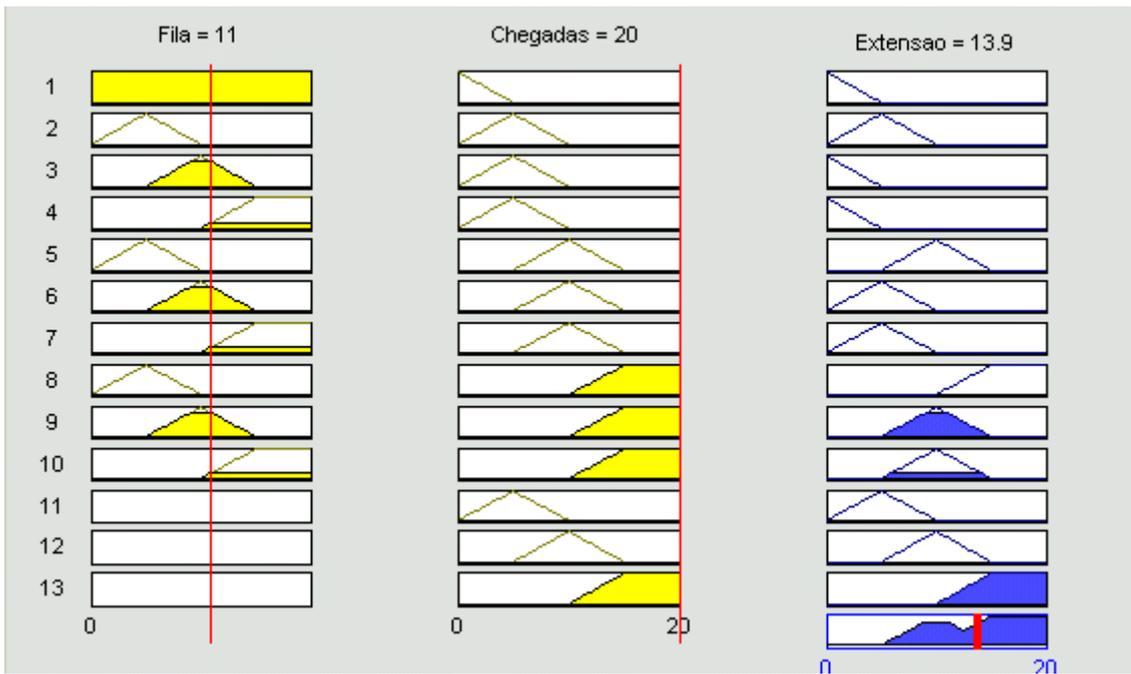
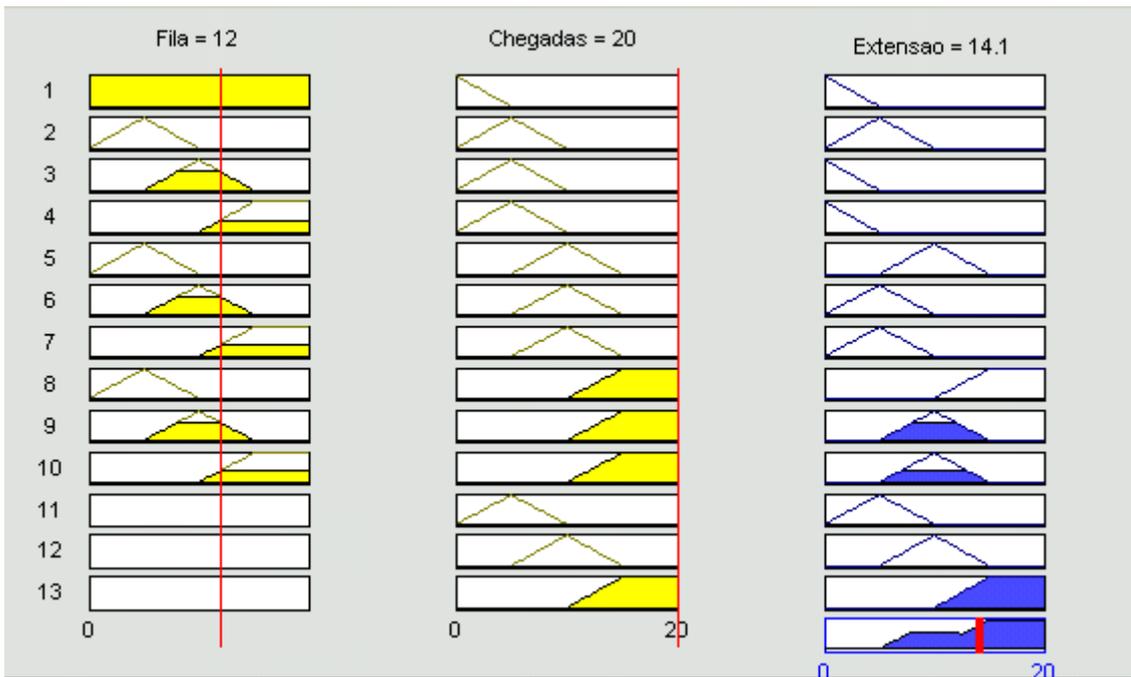


Figura 4.4 - Superfície de controle referente ao Caso 01

Apesar das regras estabelecidas (Ver tabela 4.2) terem assegurado uma superfície de controle sem descontinuidades, observa-se ainda algumas irregularidades na Figura 4.4, decorrentes do processo geral do controlador *fuzzy* para a determinação do valor das extensões. Por exemplo, para o número de chegadas igual a 20, à medida que o tamanho da fila na aproximação conflitante cresce, a tendência é que os valores da extensão diminuam. No entanto, para as filas com 12 e 13 veículos, a extensão aumenta levemente (0,2 segundos), como pode ser visto na Figura 4.4 e na área destacada da Tabela 4.6. A Figura 4.5 mostra a operação do controlador *fuzzy* para os casos: chegada de 20 veículos com fila de 11 veículos e chegada de 20 veículos com fila de 12 veículos.



(a) Chegada de 20 veículos com fila de 11 veículos



(b) Chegada de 20 veículos com fila de 12 veículos

Figura 4.5 – Operação do controlador *fuzzy* para as chegadas de 20 veículos com fila de 11 e 12 veículos

Tabela 4.6 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 01 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Fila - Número de veículos	0	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	
	1	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	6	16	32	41	46	49	49	61	70	78	86	88	102	113	124	135	152	152	152	152	152	152	152
	7	16	32	41	46	46	46	58	67	74	80	81	94	105	115	130	146	146	146	146	146	146	146
	8	16	32	41	43	43	44	55	63	71	76	78	89	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	9	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	10	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	11	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	12	16	32	41	43	43	44	55	63	71	76	78	89	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	13	16	32	41	43	43	44	55	63	71	76	78	89	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	14	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	15	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	16	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	17	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	18	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	19	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	20	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139

4.5 – SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO SOB CADA PLANILHA PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO E VOLUME, COM O PROGRAMA HUTSIM

Realizadas as modificações nos conjuntos *fuzzy* mencionadas no item 4.4 e geradas as planilhas correspondentes no MATLAB, estas foram introduzidas, uma a uma, no *software* HUTSIM (Kosonen, 1999) para diferentes simulações da operação do tráfego. Para cada planilha simulou-se o comportamento do tráfego para as condições e níveis de volume mencionados seção 4.2.

O HUTSIM, desenvolvido na *Helsinki University of Technology* – HUT, Finlândia, é um *software* de simulação microscópica do fluxo de tráfego que roda em um PC e interage com situações reais de controle de tráfego ou realiza simulações a partir de dados de tráfego fornecidos pelo usuário, como foi feito neste estudo. Ele vem sendo utilizado nos diversos trabalhos relacionados a controladores semafóricos *fuzzy* e também para estudos de outras estratégias de controle atuado pelo tráfego. A sua utilização neste estudo deve-se ao fato do programa ter sido especialmente adaptado para a simulação de controladores *fuzzy* a partir das planilhas geradas pelo MATLAB.

4.5.1 – Resultados das simulações

As simulações no HUTSIM foram feitas para cada caso considerando 10 (dez) simulações independentes de 1 (uma) hora de duração cada, de modo a permitir posterior tratamento estatístico dos resultados e a investigação de dois importantes aspectos: o primeiro aspecto refere-se ao desempenho do tráfego, avaliado através do atraso médio e da porcentagem de veículos parados; o segundo aspecto refere-se à variação dos valores de controle, baseados no tempo médio de verde e no ciclo médio. Os resultados do estudo de simulação estão apresentados nas Tabelas 4.7 a 4.9 e nas Figuras 4.6 a 4.13.

Foram consideradas nas simulações as seguintes particularidades: tempo de verde mínimo de 5 segundos; número máximo de 5 extensões na operação do controlador *fuzzy*; e extensões menores ou iguais a 2 segundos finalizam o tempo de verde corrente.

Tabela 4.7 – Resultados das simulações para a via principal para os três níveis de volume estudados

Medidas de desempenho						
Casos	Atraso médio (média)			Atraso médio - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	6,93	11,66	16,22	8,79	5,04	2,96
02	7,02	11,56	16,28	8,41	5,53	2,49
03	6,96	11,33	16,37	6,68	4,87	5,65
04	6,89	11,37	16,4	6,06	4,62	3,34
05	6,98	11,7	16,08	7,60	6,12	3,21
06	7,16	11,58	15,81	5,15	4,47	3,19
07	7,21	11,54	15,79	5,25	4,61	3,45
Casos	Veículos parados (média)			Veículos parados - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	37,41	47,31	56,16	6,63	3,98	3,20
02	37,83	46,81	55,94	6,84	4,37	2,43
03	37,65	45,06	54,28	5,27	3,62	4,58
04	37,29	44,98	54,06	4,71	3,66	2,58
05	37,6	47,54	55,36	5,84	4,70	2,39
06	38,73	48,2	55,48	3,99	3,91	2,58
07	39,22	48,17	55,57	5,16	2,89	2,19
Medida de controle						
Casos	Tempo médio de verde (média)			Tempo médio de verde - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	19,01	31,15	41,02	5,03	2,61	1,50
02	18,98	30,97	40,77	4,41	1,66	1,38
03	19,55	34,83	45,71	4,58	1,74	1,48
04	19,48	34,94	45,08	4,94	2,06	1,73
05	18,93	31,44	41,39	4,89	2,42	1,99
06	18,15	28,99	37,97	4,91	1,56	1,51
07	18,09	29	38,2	5,18	2,03	1,70

Tabela 4.8 – Resultados das simulações para a via secundária para os três níveis de volume estudados

Medidas de desempenho						
	Atraso médio (média)			Atraso médio - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	10,63	15,88	21,22	11,04	3,53	2,75
02	10,6	16,14	21,45	9,82	3,43	2,56
03	10,75	17,68	22,9	7,74	4,70	3,02
04	10,69	17,69	23,06	6,43	4,49	2,77
05	10,57	16,35	21,91	10,21	4,44	3,02
06	10,11	15,61	20,46	6,70	5,36	3,42
07	10,15	15,6	20,54	6,65	4,84	2,19
Casos	Veículos parados (média)			Veículos parados - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	53,73	60,4	65,58	7,82	3,47	2,59
02	53,42	61,37	66,03	6,64	2,99	2,73
03	53,05	62,53	66,2	7,93	4,32	2,51
04	52,84	62,69	67,14	7,15	4,52	3,06
05	53,3	61,21	66,3	6,52	3,14	3,49
06	52,19	60,82	66,16	7,17	4,62	3,09
07	52,03	61,14	66,01	6,99	3,76	2,06
Medida de controle						
Casos	Tempo médio de verde (média)			Tempo médio de verde - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	10,42	16,78	22,93	4,87	3,71	5,14
02	10,5	16,33	22,88	4,44	4,48	4,08
03	10,62	17,84	24,97	4,84	5,92	4,28
04	10,59	17,58	24,6	5,50	6,04	4,50
05	10,46	16,94	22,94	4,47	6,32	4,45
06	10,38	15,94	21,63	4,72	4,67	4,27
07	10,35	15,88	22,03	4,93	3,87	5,09

Tabela 4.9 – Resultados das simulações para a interseção para os três níveis de volume estudados

Medidas de desempenho						
Casos	Atraso médio (média)			Atraso médio - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	7,82	12,7	17,57	3,40	2,92	2,25
02	7,88	12,68	17,69	3,43	4,27	1,93
03	7,87	12,92	18,13	4,02	3,88	4,11
04	7,81	12,92	18,22	3,79	3,57	2,47
05	7,84	12,85	17,65	3,14	3,90	2,11
06	7,88	12,6	17,09	2,45	4,25	2,89
07	7,93	12,56	17,08	2,59	4,15	2,32
Casos	Veículos parados (média)			Veículos parados - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	41,38	50,59	58,72	2,72	3,00	2,28
02	41,6	50,45	58,68	3,48	3,71	1,80
03	41,34	49,42	57,49	3,31	3,07	3,35
04	41,02	49,39	57,58	3,01	2,85	1,68
05	41,41	50,92	58,33	2,63	3,44	1,73
06	42	51,36	58,34	2,30	3,32	1,83
07	42,34	51,42	58,41	3,47	2,39	1,18
Medida de controle						
Casos	Ciclo médio (média)			Ciclo médio - CV (%)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
01	41,44	59,88	75,97	2,32	2,15	1,98
02	41,48	59,25	75,61	1,88	1,78	1,72
03	42,18	64,59	82,68	2,30	2,38	1,77
04	42,09	64,41	81,7	2,93	2,58	1,97
05	41,39	60,28	76,35	2,33	2,74	2,11
06	40,55	56,87	71,6	2,84	2,15	1,81
07	40,46	56,81	72,19	3,03	2,03	2,23

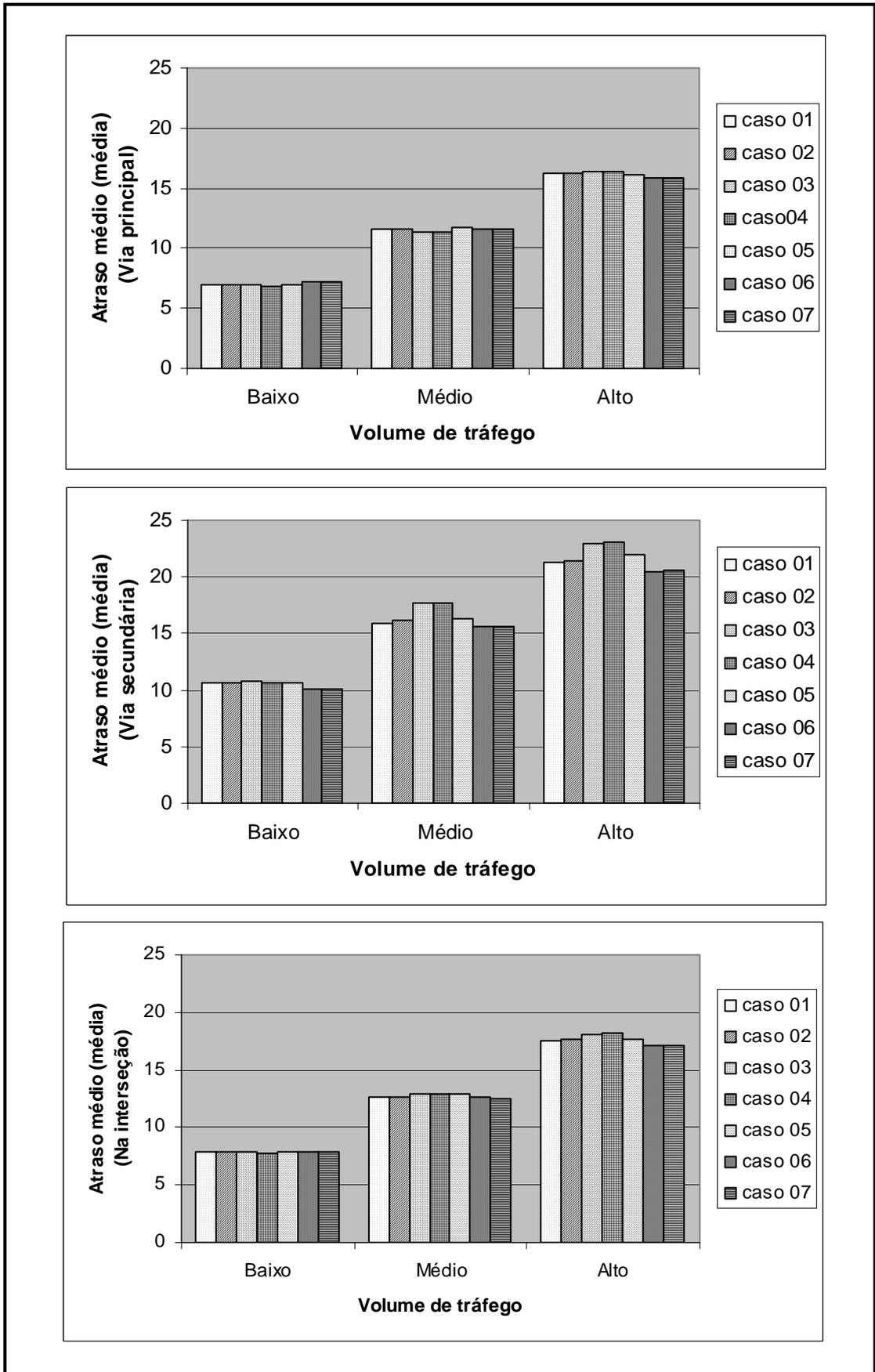


Figura 4.6 – Atraso médio (média)

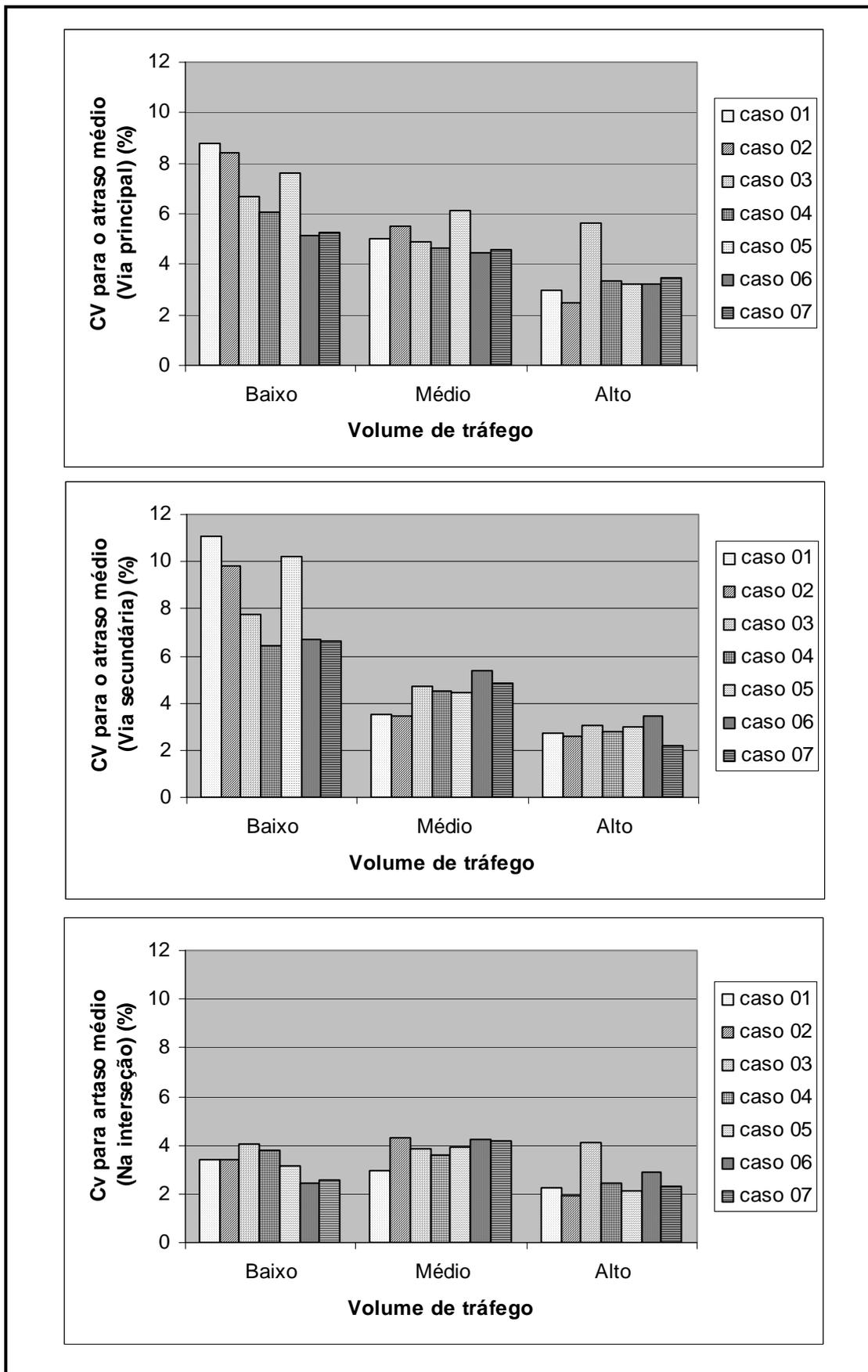


Figura 4.7 – CV para atraso médio

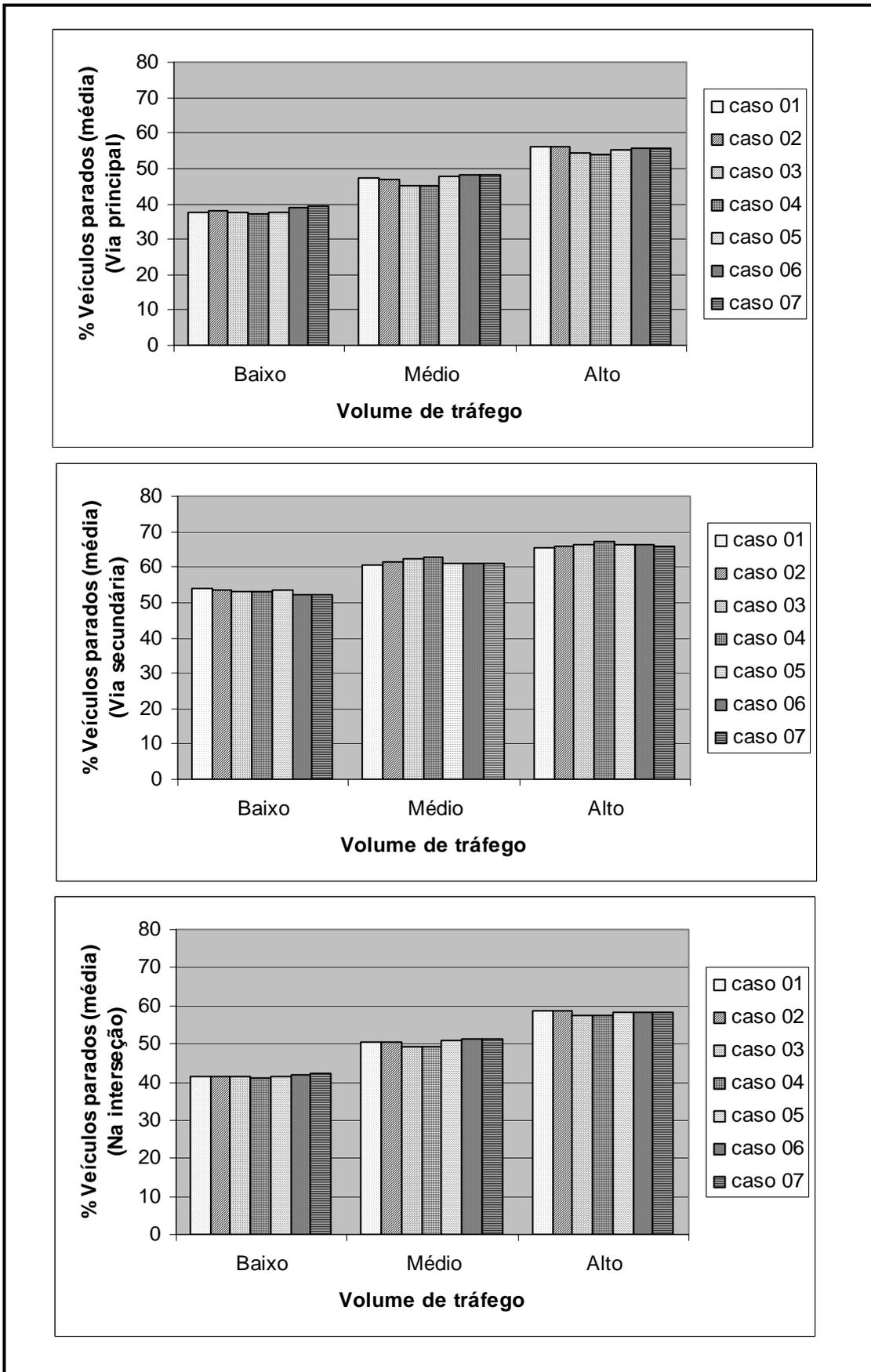


Figura 4.8 – Porcentagem de veículos parados (média)

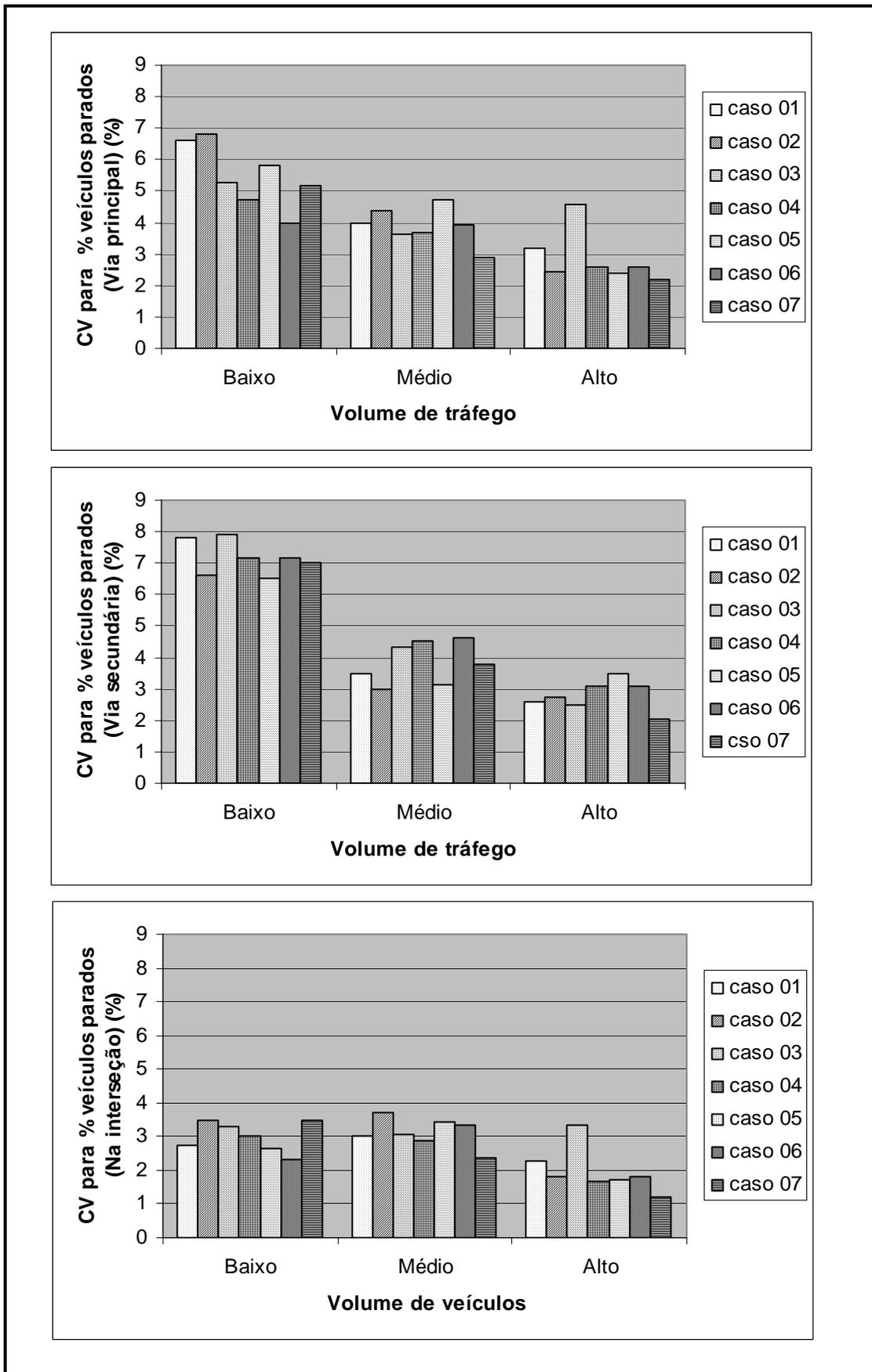


Figura 4.9 – CV para porcentagem de veículos parados

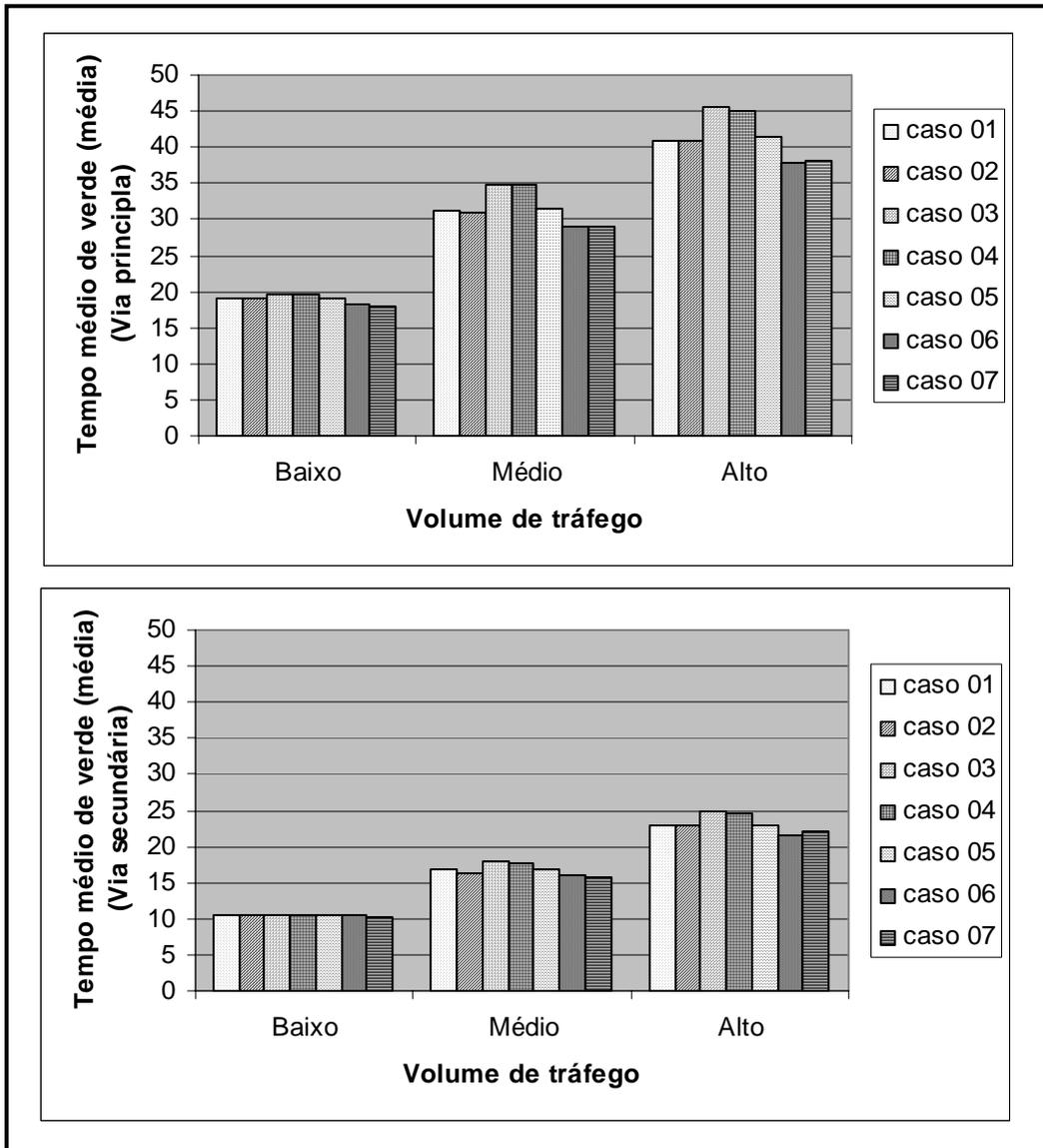


Figura 4.10 – Tempo médio de verde (média)

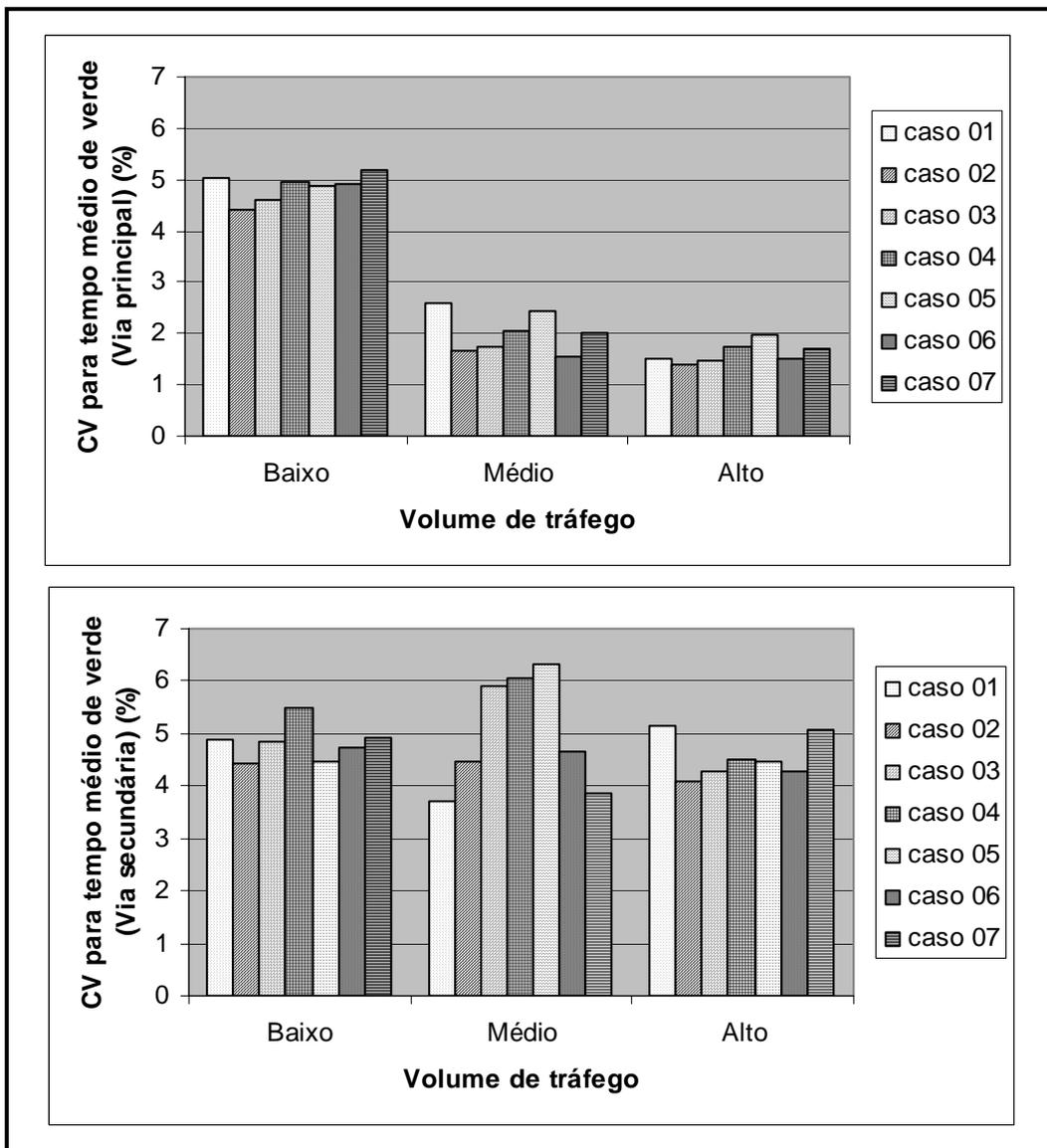


Figura 4.11 – CV para tempo de verde médio

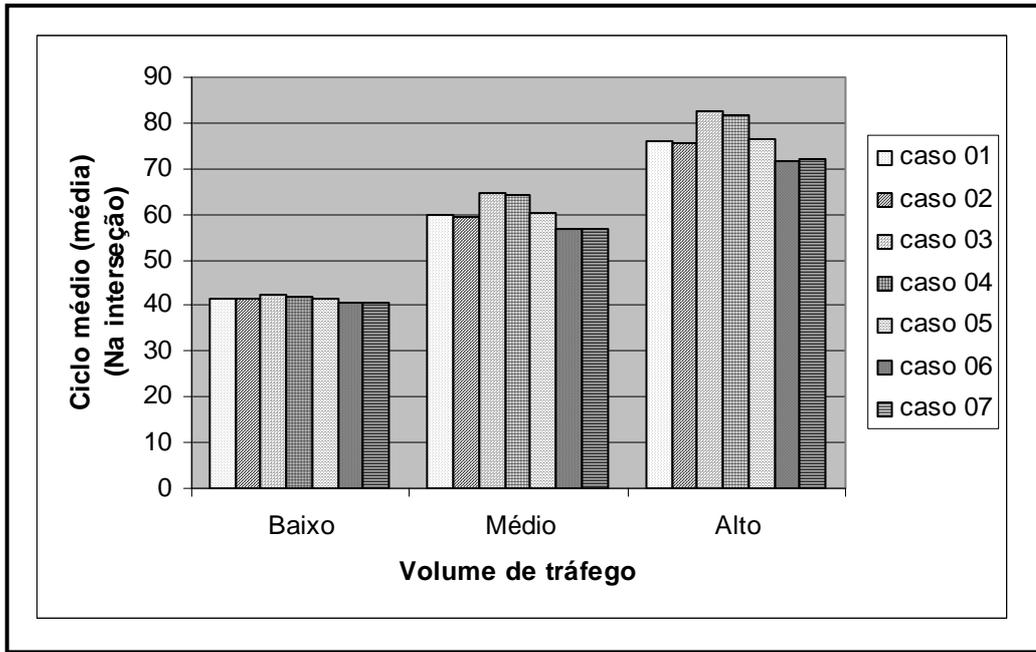


Figura 4.12 – Ciclo médio (média)

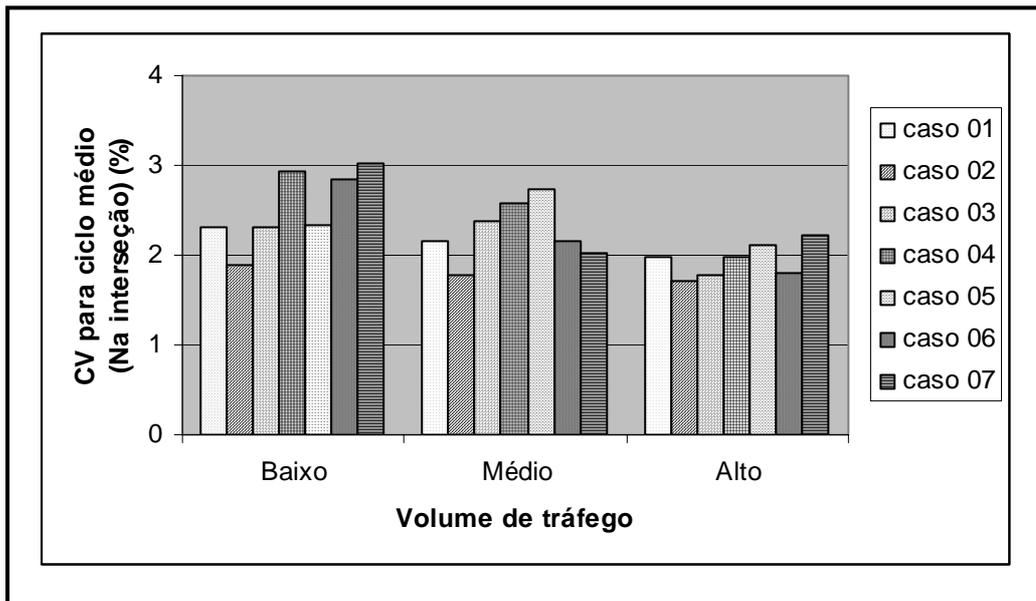


Figura 4.13 – CV para ciclo médio

4.5.2 – Avaliação qualitativa dos resultados

Pelos gráficos mostrados na Figura 4.6, relacionados ao impacto das modificações nos conjuntos *fuzzy* sobre o atraso médio para as três condições de volume, verifica-se que somente para as situações de volume médio e alto na via secundária é que os diferentes casos produzem resultados com diferenças mais acentuadas.

Já os gráficos da Figura 4.7, que permitem verificar como a medida de desempenho varia ao longo do período de estudo (10 horas), indicam que para o nível de volume baixo, o caso 06 é o que produz resultados mais estáveis e o Caso 01 os resultados menos estáveis. No caso do volume alto, o Caso 02 produz resultados mais estáveis e o Caso 03 os menos estáveis. Para o nível médio de volume o impacto dos diferentes casos sobre a estabilidade da medida de desempenho é distinto para a via principal, secundária e global.

O impacto dos diferentes casos sobre a porcentagem de veículos parados nas aproximações da via principal, secundária e global pode ser avaliado através da Figura 4.8. Para o nível de volume baixo, as diferenças são praticamente inexistentes. Para os outros níveis, embora perceptíveis, as diferenças são muito pequenas.

Os coeficientes de variação da medida de desempenho considerada, conforme os gráficos da Figura 4.9, diferem entre os casos estudados. Para a aproximação da via principal e para a interseção como um todo, o Caso 06 produz os resultados mais estáveis para o nível de volume baixo, e o Caso 07 para os níveis médio e alto. Para a aproximação da via secundária, os resultados mais estáveis são obtidos com os Casos 02 e 05 para os níveis de volume baixo e médio, e com o Caso 07 para o nível alto.

A avaliação do impacto dos casos estudados sobre a resposta do controlador, efetuada através as Figuras 4.10 e 4.12, permite verificar que esta resposta é sensível às modificações nos conjuntos *fuzzy*, especialmente para os níveis de volume médio e alto. A Figura 4.11 permite verificar que o tempo de verde para a via secundária varia bem mais ao longo do período de 10 horas do que o tempo de verde da via principal, especialmente nos caso dos níveis de volume médio e alto.

Os resultados das simulações efetuadas serão avaliados de modo mais apropriado na seção 4.6, onde através da Análise de Variância poder-se-á verificar se as diferenças observadas nos gráficos são estatisticamente significativas.

Outra análise a ser feita diz respeito ao impacto genérico da expansão da base dos conjuntos *fuzzy* de entrada sobre os respectivos universos de discurso. Essa análise pode ser melhor realizada observando-se a Tabela 4.10, onde o Caso 04 corresponde aos menores valores extremos dos conjuntos *fuzzy* de entrada, o Caso 01 é o caso básico, e o Caso 07 corresponde aos maiores valores extremos dos conjuntos *fuzzy* de entrada.

Tabela 4.10 - Resultados das simulações para os três níveis de volume estudados para os Casos 01, 04 e 07

	Medidas de desempenho (Via principal)			Medidas de desempenho (Via secundária)		
Casos	Atraso médio (média)			Atraso médio (média)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
04	6,89	11,37	16,4	10,69	17,69	23,06
01	6,93	11,66	16,22	10,63	15,88	21,22
07	7,21	11,54	15,79	10,15	15,6	20,54
	Veículos parados (média)			Veículos parados (média)		
Casos	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
	04	37,29	44,98	54,06	52,84	62,69
01	37,41	47,31	56,16	53,73	60,4	65,58
07	39,22	48,17	55,57	52,03	61,14	66,01
	Medida de controle (Via principal)			Medida de controle (Via secundária)		
Casos	Tempo médio de verde (média)			Tempo médio de verde (média)		
	Nível de volume			Nível de volume		
	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Médio	Alto
04	19,48	34,94	45,08	10,59	17,58	24,6
01	19,01	31,15	41,02	10,42	16,78	22,93
07	18,09	29	38,2	10,35	15,88	22,03

Pela Tabela 4.10, à medida que os conjuntos *fuzzy* de entrada são expandidos, pode-se concluir que:

- tanto o verde médio da via principal quanto da secundária, para todos os níveis de volume, diminuem;
- os atrasos médios na via principal, para o nível de volume baixo, aumentam e para a via secundária, reduzem. Para o nível de volume médio, na via principal, não se observa nenhuma tendência de comportamento; já para a via secundária, verifica-se

uma redução dos atrasos médios. Para o nível de volume alto, tanto na via principal, quanto na via secundária, ocorre redução nos atrasos médios;

- c. a porcentagem de veículos parados na via principal, para os níveis de volume baixo e médio, aumenta. Nenhuma tendência de comportamento foi observada para os outros níveis de volume, tanto para a via principal quanto para a via secundária.

4.6– AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados gerados pelo estudo de simulação foram analisados de acordo com os dois aspectos apresentados na seção 4.5: resposta do controlador e desempenho do tráfego. Uma Análise de Variância (ANOVA) foi realizada, para cada um dos três níveis de volume, de modo a verificar quais medidas de desempenho e medidas de controle apresentam impacto significativo nos resultados da simulação. A Tabela 4.11 mostra os resultados desta avaliação.

Pela Tabela 4.11 pode-se concluir que:

1. Para o nível de volume baixo nenhuma medida de desempenho apresentou impacto significativo. Já as medidas de controle correspondentes ao tempo médio de verde na via principal e ao ciclo médio apresentaram impactos significativos;
2. Para o nível de volume médio, as medidas de desempenho porcentagem de veículos parados na via principal, atraso médio na via secundária e porcentagem de veículos parados na interseção, e as medidas de controle, tempo médio de verde nas vias principal e secundária e o ciclo médio, apresentaram impactos significativos;
3. Para o nível de volume alto, as medidas de desempenho, porcentagem de veículos parados na via principal, atraso médio na via secundária e o atraso médio na interseção, e as medidas de controle, tempo médio de verde nas vias principal e secundária e o ciclo médio apresentaram impactos significativos.

Estes resultados são compatíveis com a avaliação efetuada diretamente através dos gráficos. Como a variabilidade de todos os aspectos considerados, verificadas através do Coeficiente de variação (CV) foi sempre maior para o nível de volume baixo do que para os níveis médio e alto, é possível compreender que a variação observada entre os casos não é significativamente maior do que a observada entre diferentes observações para o mesmo caso.

Tabela 4.11 – Resumo da análise de variância para os três níveis de volume estudados

	Valores da estatística F		
	Níveis de volume		
	Baixo	Médio	Alto
Medidas de desempenho:			
• Atraso médio na via principal;	0,6	0,558	1,879
• Porcentagem de veículos parados na via principal;	1,189	5,421	2,416
• Atraso médio na via secundária;	0,828	15,289	28,516
• Porcentagem de veículos parados na via secundária;	0,275	1,274	0,640
• Atraso médio na interseção;	0,255	0,916	8,923
• Porcentagem de veículos parados na interseção;	1,262	2,769	1,682
Resposta do controlador:			
• Tempo médio de verde para a via principal;	3,965	141,977	199,988
• Tempo médio de verde para a via secundária;	0,408	7,793	13,720
• Duração do ciclo	4,053	52,498	81,635
Obs: $F_{\text{crítico}} = F_{6,63,0,05} = 2,25$ Nível de significância de 5%			

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTO PARA A CONSTRUÇÃO DOS CONJUNTOS *FUZZY*

5.1 – INTRODUÇÃO

Segundo Genaro (1986) o conhecimento pode se originar de diversas fontes, individuais ou combinadas, como livros, registros, banco de dados, estudo de casos, dados empíricos ou experiências pessoais. Entretanto, para o desenvolvimento de sistemas de controle automático, como é o caso dos controladores *fuzzy*, no caso particular estudado, controladores semafóricos *fuzzy*, a principal delas é a extraída do conhecimento de especialistas do domínio, de onde o engenheiro obtém o conhecimento especializado através da interação com o especialista.

Entende-se por especialista o profissional que detém o conhecimento e o fornecerá sob a forma de regras para que o sistema o use. De acordo com Rodriguez (1999), especialistas são indivíduos com bastante conhecimento, experiências, capacidade de predição e objetividade.

São requeridos, no projeto de controladores semafóricos *fuzzy*, o conhecimento e a experiência do controlador de tráfego para o desenvolvimento dos seus principais componentes. Estudo realizado por Jacques *et al.* (2002) revelou que, na maioria dos controladores semafóricos *fuzzy* analisados, os conjuntos *fuzzy* de entrada e saída foram projetados exclusivamente com base no conhecimento e experiência dos especialistas. No entanto, em nenhum trabalho foi apresentado, ou mesmo indicado, o procedimento empregado para a aquisição deste conhecimento.

Neste contexto, este capítulo apresenta desenvolvimento de um procedimento para a aquisição das informações necessárias para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos. Para isso, as seguintes atividades foram realizadas:

1. concepção do procedimento;
2. aplicação do procedimento e coleta dos dados;
3. tratamento dos dados;
4. construção das funções de pertinência e dos conjuntos *fuzzy*;
5. avaliação dos resultados.

5.2 – CONCEPÇÃO DO PROCEDIMENTO

Esta etapa do trabalho consiste na concepção da estrutura do procedimento para a aquisição das informações necessárias para a construção dos conjuntos *fuzzy* junto aos especialistas na área de trânsito.

O objetivo deste procedimento é obter as informações necessárias para a posterior construção dos conjuntos *fuzzy* básico que serão utilizados num controlador semafórico *fuzzy*, similar ao descrito no Capítulo 4, seção 4.3.

A abordagem feita aos especialistas foi realizada através de questionários objetivando obter as opiniões mais fidedignas do grupo de especialistas da área. Foi considerado que estes eram encarregados de controlar a interseção mostrada na Figura 5.1. Foram analisadas 100 situações diferentes de fluxo de tráfego e a cada situação pediam-se as informações descritas abaixo. Esta análise foi feita utilizando-se apresentação em *Power Point* em conjunto com o questionário elaborado, apresentado no Apêndice C.

As informações solicitadas foram: classificação do número de veículos na aproximação que está recebendo indicação semafórica verde (fila em movimento), a classificação do número de veículos na aproximação que está recebendo indicação semafórica vermelha (fila parada), classificação da extensão do tempo de verde que deveria ser dado para a fila em movimento, e o número de veículos que seriam servidos nesse tempo adicional.

Para as duas primeiras informações, os especialistas poderiam classificá-las em pequena, média ou grande. O tempo de verde estendido poderia ser classificado em curto, médio ou longo e a última pergunta seria respondida por um valor numérico, posteriormente transformado em tempo necessário para a passagem da quantidade de veículos indicada, adotando-se o *headway* de descarga médio igual a 2 seg/veic. Isso foi feito acreditando-se que a visão de número de veículos é mais fácil de ser percebida pelos especialistas da área que a de quantificar tempo.

Foram consideradas algumas características particulares no modelo do sistema, tais como:

1. as vias analisadas têm a mesma prioridade (duas vias principais);
2. a interseção analisada opera de forma isolada;

3. cada aproximação possui somente uma faixa de trânsito;
4. a extensão máxima admissível para a fila é a indicada na Figura 5.1;
5. a fila em movimento já está recebendo verde há 30 segundos.

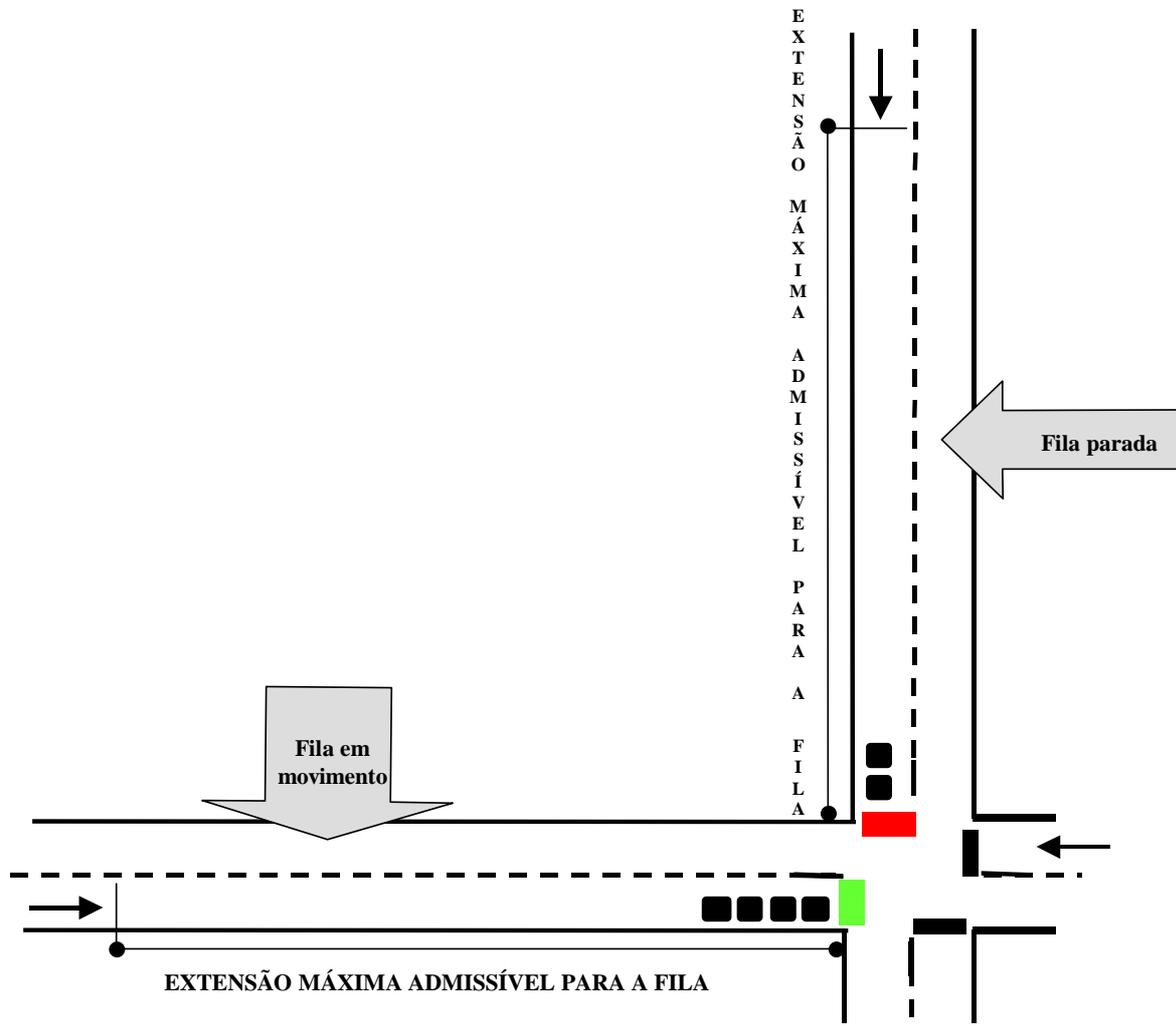


Figura 5.1 - Exemplo de situação de tráfego apresentada

5.3 – APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO E COLETA DOS DADOS

Foi feito um teste piloto inicial em que o procedimento desenvolvido e descrito na seção 5.2 foi aplicado a um grupo de 04 especialistas da área de engenharia de tráfego. Estes foram encaminhados pelo órgão gestor de trânsito no Distrito Federal. Nesta etapa do trabalho procurou-se obter opiniões e informações adicionais que melhorassem e esclarecessem o objetivo deste procedimento.

Após o teste piloto, solicitou-se a presença desses mesmos especialistas e o questionário foi aplicado de modo a obter as informações necessárias. Foi realizada, também, coleta de dados na cidade de Porto Alegre, com 03 especialistas responsáveis pela operação do trânsito naquela cidade. A coleta dos dados foi feita através de reunião com a presença dos especialistas em sala onde as imagens com cada situação de tráfego foram exibidas em apresentação de *Power Point*, uma a uma, e cada especialista, individualmente, utilizando o questionário desenvolvido, analisava as situações e respondia as três questões apresentadas, classificando-as de acordo com os critérios estabelecidos:

- **Questão 1:** Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERDE (fila em movimento)?
- **Questão 2:** Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERMELHA (fila parada)?
- **Questão 3:** Admitindo que já se passaram 30 segundos de VERDE, responda: Você estenderia o VERDE por um período de tempo curto, médio ou longo? Quantos veículos seriam servidos nesse tempo adicional?

O tempo de apresentação de cada imagem foi controlado, objetivando que a análise se desse somente de maneira visual. Foram apresentadas 100 situações de tráfego diferentes, onde se variava o número de veículos na fila em movimento e na fila parada. A Tabela 5.1 ilustra o questionário fornecido e as informações solicitadas (Ver Apêndice C).

b) variável de saída

- Extensão – extensão dada ao tempo de verde corrente, isto é, a extensão do tempo de verde que deve ser fornecida à aproximação que está sendo servida.

Foram adotados para as variáveis linguísticas relacionadas acima os seguintes conjuntos *fuzzy* possíveis:

Variável		Conjunto Fuzzy		
• Fila (número de veículos)	→	Pequena	Média	Grande
• Chegada (número de veículos)	→	Pequena	Média	Grande
• Extensão (segundos)	→	Curta	Média	Longa

A partir do procedimento desenvolvido neste trabalho foram obtidos os elementos iniciais pertencentes a cada conjunto *fuzzy* definido e suas funções de pertinência foram obtidas utilizando-se o método proposto por Sebag e Schoenauer (1990), chamado de método indutivo de aprendizado. Os valores de cada conjunto *fuzzy* para variáveis definidas estão relacionados a seguir.

a) Resultados da aplicação do questionário no Distrito Federal

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável chegada (em número de veículos):

- Pequena
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10};
- Média
{7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17};
- Grande
{13,14,15,16,17,18,19,20}.

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável fila (em número de veículos):

- Pequena
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10};
- Média
{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17};

- Grande
{11,12,13,14,15,16,17,18,19,20}.

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável extensão (em segundos):

- Curta
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16}
- Média
{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30}
- Longa
{20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50}

b) Resultados da aplicação do questionário em Porto Alegre

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável chegada (em número de veículos):

- Pequena
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10};
- Média
{7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17};
- Grande
{12,13,14,15,16,17,18,19,20}.

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável fila (em número de veículos):

- Pequena
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10};
- Média
{4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,17};
- Grande
{11,12,13,14,15,16,17,18,19,20}.

Valores dos conjuntos *fuzzy* para a variável extensão (em segundos):

- Curta
{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12}

- Média

{8,9,10,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30}

- Longa

{14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40}

Pelos valores definidos para os elementos dos conjuntos *fuzzy*, observa-se que os técnicos das duas cidades, a partir de uma clara delimitação do comprimento máximo admissível da fila nas aproximações, classificaram as filas de forma praticamente idêntica. No entanto, no que diz respeito à ação de controle, as diferenças são marcantes.

A partir dos valores dos conjuntos *fuzzy* obtidos, o próximo passo será a definição das funções de pertinência para a construção dos conjuntos *fuzzy* relacionados.

5.4.1 – Definição das funções de pertinência

A definição das funções de pertinência é uma etapa fundamental e difícil no desenvolvimento da aplicação de sistemas *fuzzy* e não há regras definitivas para a escolha dessas funções, as quais representam o conhecimento de um especialista no assunto em questão ou informações extraídas de um banco de dados (Falcão, 2002). Esta definição pode ser feita através da percepção de especialista ou de um grupo de especialistas, aplicando-se questionários junto a estes, do uso de redes neurais ou algoritmos genéticos.

A definição das funções de pertinência a partir de consulta a especialistas pode ser tão difícil quanto a definição das regras *fuzzy*, isto porque as funções de pertinência dependem do contexto em que são definidas e a conceituação dos valores das variáveis linguísticas pode depender de várias características independentes, mesmo que dentro do mesmo contexto.

O método utilizado neste trabalho para a construção das funções de pertinência foi o proposto por Sebag e Schoenauer (1990), chamado de método indutivo de aprendizado.

Método indutivo de aprendizado

Considere-se que T representa algumas premissas qualitativas que, em conjunto (atendidas simultaneamente), generalizam o exemplo Ex . No trato com uma conclusão qualitativa, a

conclusão associada às premissas T é simplesmente a conclusão do exemplo Ex , ou seja, a conclusão de exemplos cobertos por T . Será utilizada a notação $Ex \prec T$, para representar que o exemplo Ex é coberto por T . Assim sendo, a função de pertinência do domínio de F associado às premissas T , é projetada como segue:

- Considerando um seletor numérico envolvido nas premissas $T : [x=V]$, onde V é um intervalo do domínio de “ x ”, dois casos podem ocorrer:
1. O conjunto *fuzzy* não contém nenhum limite do domínio de “ x ”. Neste caso o seletor $[x=V]$ é substituído por uma função triangular. Seja x_T o valor médio de “ x ” definido a partir de todos os exemplos que satisfazem as premissas T . O topo do triângulo corresponde ao valor médio x_T e sua altura é igual a 1. A altura média do triângulo é alcançada para os valores $U_{x,T}$ e $L_{x,T}$, que são chamados, respectivamente, de média superior e média inferior de “ x ” e são definidos por:

$$U_{x,T} = \text{Média} \{x(Ex), Ex \prec T, x(Ex) > x_T\} \quad (5.1)$$

$$L_{x,T} = \text{Média} \{x(Ex), Ex \prec T, x(Ex) < x_T\} \quad (5.2)$$

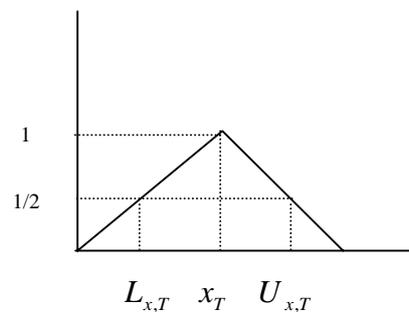


Figura 5.2 – conjunto *fuzzy* não contém limite de x

2. O conjunto *fuzzy* contém limite do domínio de “ x ”. Neste caso o seletor $[x=V]$ é substituído por uma função de pertinência monotônica, que assume o valor 1 desde o valor médio x_T até o limite correspondente do domínio de x . Duas situações são possíveis:

- V contém o limite inferior de x

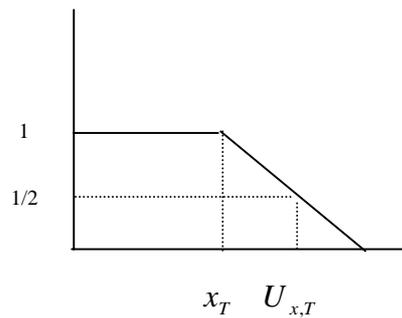


Figura 5.3 – Conjunto *fuzzy* contém limite inferior de x

- V contém o limite superior de x

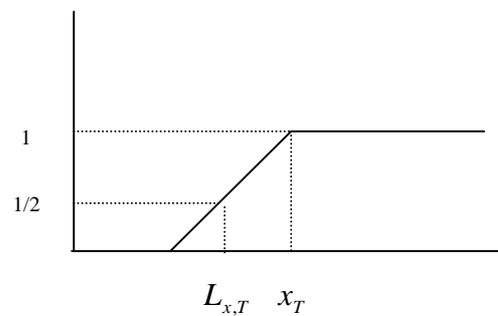


Figura 5.4 – Conjunto *fuzzy* contém limite superior de x

5.5 – CONSTRUINDO AS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA E OS CONJUNTOS FUZZY

Para cada variável relacionada foi aplicado o método indutivo de aprendizado (Sebag e Schoenauer,1990) para a construção das funções de pertinência e dos respectivos conjuntos *fuzzy* definidos para cada uma das variáveis. A partir dos dados fornecidos pelos especialistas, os valores dos parâmetros definidos pelo método para cada um dos conjuntos *fuzzy* foram calculados e estão relacionados nas Tabelas 5.2, 5.3 e 5.4. Como os autores não definem o tipo de média utilizada, adotou-se para o cálculo da média a aritmética simples.

Tabela 5.2 – Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos *fuzzy* da variável “chegada”

Variável “chegada”		
Conjunto <i>fuzzy</i> - Pequena	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 5$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 8$ para $\mu=0,5$	$x_T = 5$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 8$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - Média	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (não existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 12$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 9$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 15$ para $\mu=0,5$	$x_T = 12$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 9$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 15$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - Grande	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 16,5$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 14,5$ para $\mu=0,5$	$x_T = 16$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 13,5$ para $\mu=0,5$

Tabela 5.3 – Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos *fuzzy* da variável “fila”

Variável “fila”		
Conjunto <i>fuzzy</i> - Pequena	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 5$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 8$ para $\mu=0,5$	$x_T = 5$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 8$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - Média	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (não existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 10,5$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 7$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 14$ para $\mu=0,5$	$x_T = 10,5$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 7$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 14$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - Grande	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 15,5$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 13$ para $\mu=0,5$	$x_T = 15,5$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 13$ para $\mu=0,5$

Tabela 5.4 – Parâmetros definidos para a construção dos conjuntos *fuzzy* da variável “extensão”

Variável extensão		
Conjunto <i>fuzzy</i> - Curta		
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 8$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 12,5$ para $\mu=0,5$	$x_T = 6$ para $\mu=1$ $U_{x,T} = 9,5$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - Média	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (não existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 17$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 10$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 24$ para $\mu=0,5$	$x_T = 19$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 13$ para $\mu=0,5$ $U_{x,T} = 25$ para $\mu=0,5$
Conjunto <i>fuzzy</i> - longa	Distrito Federal	Porto Alegre
Parâmetros (existe limite no conjunto <i>fuzzy</i>)	$x_T = 35$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 27$ para $\mu=0,5$	$x_T = 27$ para $\mu=1$ $L_{x,T} = 20$ para $\mu=0,5$

A partir dos valores das Tabelas 5.2 a 5.4 foram definidas as funções de pertinência e construídos os conjuntos *fuzzy*. As Figuras 5.5 e 5.6 representam os conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “chegada”, as Figuras 5.7 e 5.8 representam os conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “fila” e as Figuras 5.9 e 5.10 representam os conjuntos *fuzzy* definidos para a variável “extensão”. A Tabela 5.5 mostra os valores correspondentes de cada conjunto *fuzzy* definido para as três variáveis. Estes são os valores a serem introduzidos no MATLAB para a geração das planilhas de controle. Assim, observa-se que para as funções triangulares, três pontos são necessários e, para as trapezoidais, quatro são os valores que precisam ser introduzidos no *software*.

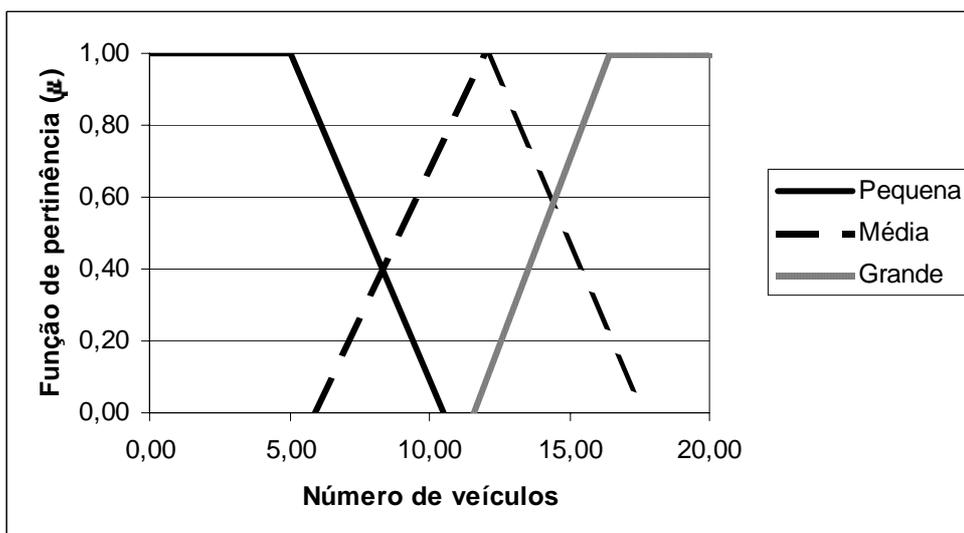


Figura 5.5 – Conjunto *fuzzy* para a variável chegada – especialistas do Distrito Federal

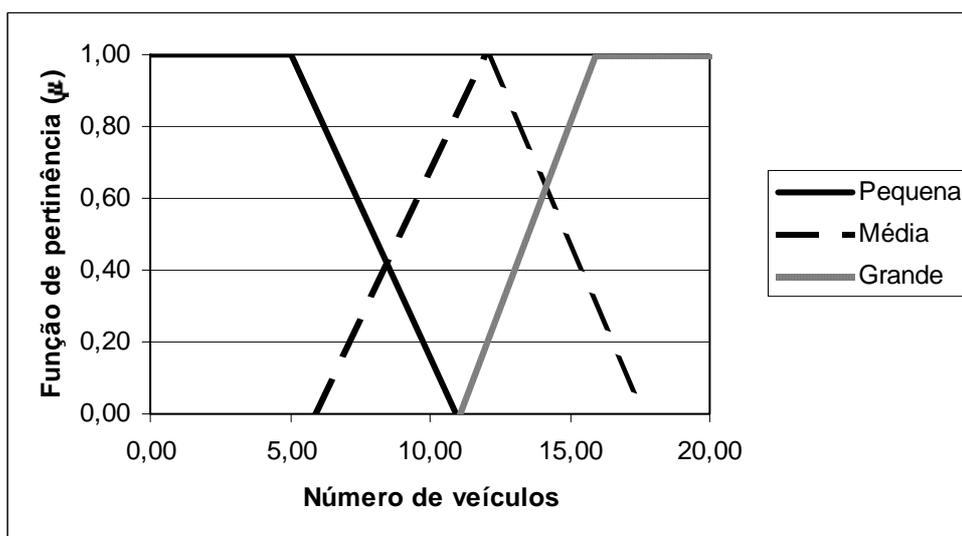


Figura 5.6 – Conjunto *fuzzy* para a variável chegada – especialistas de Porto Alegre

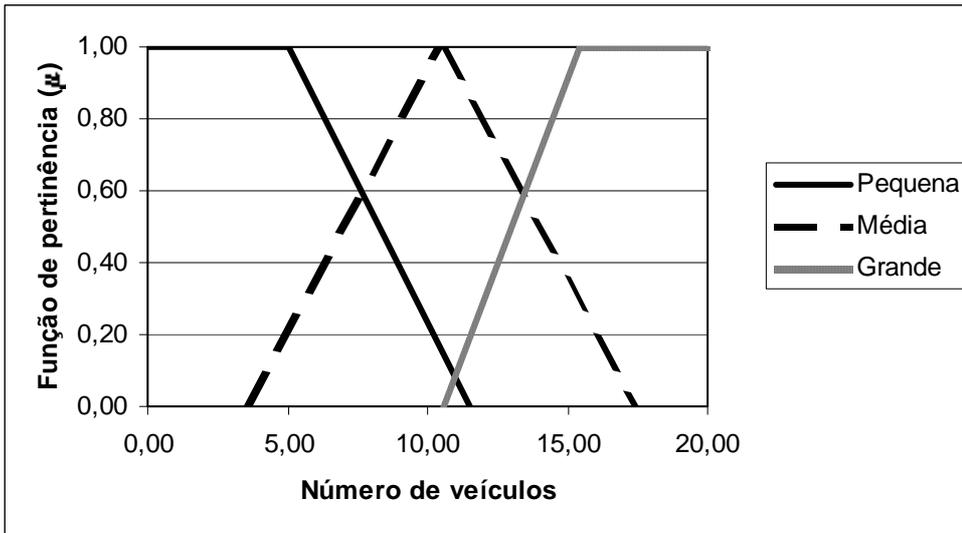


Figura 5.7 – Conjuntos *fuzzy* para a variável fila – especialistas do Distrito Federal

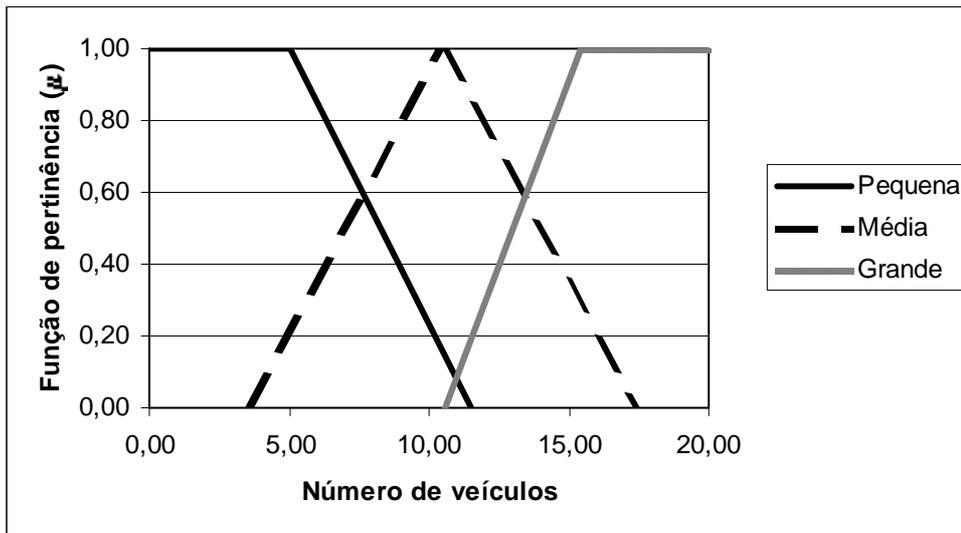


Figura 5.8 – Conjuntos *fuzzy* para a variável fila – especialistas de Porto Alegre

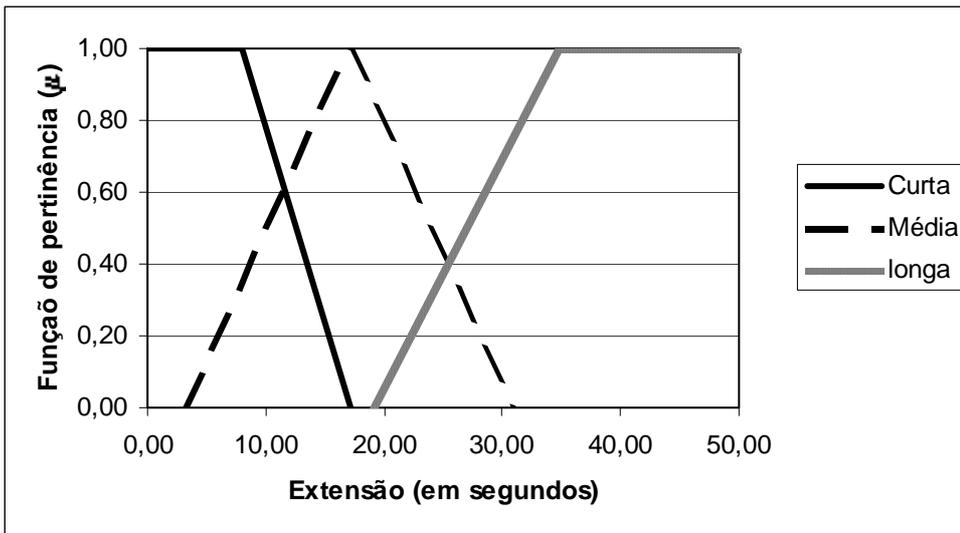


Figura 5.9 – Conjuntos *fuzzy* para a variável extensão – especialistas do Distrito Federal

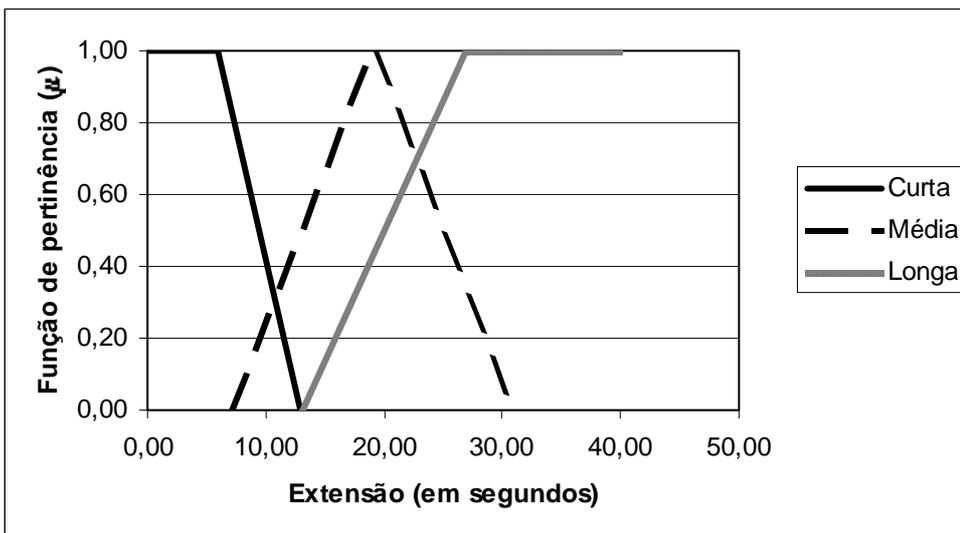


Figura 5.10 – Conjuntos *fuzzy* para a variável extensão – especialistas de Porto Alegre

Nestes casos, diferentemente dos conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador básico do Capítulo 4, alguns elementos do universo de discurso, para todas as variáveis consideradas, não possuem a soma dos graus de pertinência aos conjuntos *fuzzy* igual a 1 (Ver Apêndice A).

Tabela 5.5 – Limites dos conjuntos *fuzzy* definidos para cada variável

Variável chegada – limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>			
	Pequena (Trapezoidal)	Média (Triangular)	Grande (Trapezoidal)
Grupo DF	[0 5 10,94 10,94]	[5,8 12 17,65]	[12,5 16,5 20 20]
Grupo Porto Alegre	[0 5 10,94 10,94]	[5,8 12 17,65]	[11 16 20 20]
Variável fila – limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>			
	Pequena	Média	Grande
Grupo DF	[0 5 10,94 10,94]	[3,5 10,5 17,5]	[10,5 15,5 20 20]
Grupo Porto Alegre	[0 5 10,94 10,94]	[3,5 10,5 17,5]	[10,5 15,5 20 20]
Variável extensão – limites dos conjuntos <i>fuzzy</i>			
	Curta	Média	Longa
Grupo DF	[0 8 17,18 17,18]	[3 17 31]	[19 35 50 50]
Grupo Porto Alegre	[0 6 13 13]	[7 19 31]	[13 27 40 40]

5.6 – AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

O procedimento apresentou boa aceitação entre os especialistas consultados das cidades onde foi aplicado, e foi considerado de fácil entendimento e aplicação. Apresentou-se como uma boa ferramenta para a aquisição das informações necessárias à construção dos conjuntos *fuzzy*.

A partir dos resultados obtidos verificou-se que, para as variáveis fila e chegada, os conjuntos *fuzzy* construídos assemelham-se entre uma cidade e outra e possuem praticamente os mesmos valores limites e, conseqüentemente, as funções de pertinência. A percepção entre os especialistas destas cidades assemelha-se no que diz respeito à classificação de tamanho de filas, seja em movimento ou parada.

Para a variável extensão nota-se uma diferença entre a classificação dos valores dos conjuntos *fuzzy*. Isto pode ser devido ao fato de que os especialistas do Distrito Federal priorizam o direito de passagem de quem já está sendo servido, objetivando com isso redução do número de paradas. Pode-se notar que, para esta variável, os especialistas da cidade de Porto Alegre priorizam a redução dos atrasos na aproximação que está recebendo o vermelho e, assim, oferecem extensões menores ao tempo de verde. O impacto efetivo das diferenças observadas

nos conjuntos *fuzzy* associados à variável “extensão” poderá ser avaliado através do uso de simulação de operação de tráfego.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 – INTRODUÇÃO

A correta definição dos conjuntos *fuzzy* é de suma importância para o desempenho dos controladores semafóricos *fuzzy* e é, na maioria dos casos estudados na literatura, definida a partir do conhecimento e experiência dos especialistas. No entanto, os procedimentos adotados que assegurem a representação desta experiência não se encontram caracterizados na literatura existente.

Assim, o reconhecimento da importância do desenvolvimento de um procedimento que assegure a construção dos conjuntos *fuzzy* a partir da experiência de especialistas da área de controle de tráfego com o uso de semáforos foi a principal motivação para a realização desta pesquisa.

Este capítulo apresenta inicialmente uma análise do cumprimento dos objetivos propostos para este trabalho e da constatação das hipóteses formuladas. São abordadas as principais conclusões do estudo, incluindo tanto o que se refere aos resultados e limitações, quanto o que diz respeito às recomendações para futuros estudos.

6.2 - CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS E CONSTATAÇÃO DAS HIPÓTESES

Esta pesquisa tinha como objetivos avaliar o impacto de alteração nos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores e definir um procedimento para a construção dos conjuntos *fuzzy* utilizados em controladores semafóricos, a partir da experiência dos especialistas.

Os objetivos da pesquisa foram alcançados com sucesso e suas hipóteses comprovadas. Foi constatado que diferentes conjuntos *fuzzy* de entrada impactam significativamente a operação dos controladores semafóricos *fuzzy*. A operação foi avaliada em termos das medidas de desempenho e resposta do controlador. Com relação às medidas de desempenho estudadas, atraso médio e porcentagem de veículos parados, diferenças significativas ocorreram entre os casos estudados para alguns dos níveis de volume considerados. Foi comprovado, também,

que a resposta do controlador, verificada através do tempo de verde médio e duração do ciclo, apresentou sensibilidade em relação às alterações realizadas nos conjuntos *fuzzy* de entrada.

Para uma situação específica de caracterização de uma interseção, um procedimento para aquisição e definição dos conjuntos *fuzzy* foi concebido e testado em duas cidades brasileiras diferentes, comprovando a sua eficiência e viabilidade de utilização.

6.3 – LIMITAÇÕES DO ESTUDO

O ideal seria ter elaborado diferentes caracterizações para a interseção a ser analisada pelos especialistas, de modo a verificar se e como os conceitos “pequeno”, “médio” e “grande” associados aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada variam para diferentes condições de operação do tráfego. Isto não foi feito porque o estudo seria muito extenso e consumiria um tempo a mais dos especialistas que, uma vez que o trabalho não traria resultados diretos para os mesmos, poderia limitar o interesse destes em participar do estudo.

Como a pesquisadora não teve tempo suficiente para aprender a utilizar adequadamente o *software* HUTSIM, as simulações foram realizadas na *Helsinki University of Technology*, a partir das planilhas geradas pela pesquisadora com o MATLAB. Assim, não foi possível estender muito as análises através das simulações. O impacto que as diferentes alterações procedidas nos conjuntos *fuzzy* associadas à variável extensão produzirá sobre o desempenho do tráfego e resposta do controlador, por exemplo, não foi diretamente avaliado. Pela mesma razão, o estudo envolvendo uma interseção de vias com níveis de volumes similares também não foi realizado.

6.4 – RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Diante das limitações apresentadas anteriormente, são apresentadas a seguir algumas sugestões para futuros trabalhos associados ao tema proposto. São elas:

1. definir um procedimento para a sistematização dos dados coletados junto aos especialistas através do questionário desenvolvido, para a definição do conjunto de regras *fuzzy* que reflita os critérios de controle do tráfego adotados pelos especialistas de cada cidade;

2. desenvolver um controlador *fuzzy* a partir dos conjuntos *fuzzy* de entrada e saída, e base de regras correspondente, para cada uma das cidades pesquisadas. Este desenvolvimento deve considerar os estudos necessários à seleção dos operadores e método de *defuzzification* mais apropriado para cada caso.

BIBIOGRAFIA

- ABREU, V. C. (1999) *Desenvolvimento de uma metodologia de distribuição de viagens com aplicação da lógica fuzzy*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- AZEVEDO, F. M., BRASIL, L. M., OLIVEIRA, R. C. L. (2000). *Sistemas Fuzzy*. In: Redes Neurais – com Aplicações em controle e em Sistemas Especialistas. Florianópolis.
- BRAAE, M., D. A. RUTHERFORD (1978) *Fuzzy Relations in a Control Setting*. Vol. 7, p.p. 185-188.
- DENATRAN. Departamento Nacional de Trânsito. Manual de Semáforos, Brasília, 1984.
- FAVILLA, Jr. J., MECHION, A. GOMIDE, F. (1993) *Fuzzy Traffic control: Adaptive Strategies*. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol. 1. San Francisco.
- GADÊLHA, J. C., LOUREIRO, C. F. G., CUNHA JUNIOR, H. (1999) *Aplicação da lógica fuzzy no controle semaforico de interseções isoladas*. In: Anais do XIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Vol. 3. São Carlos.
- GENARO, S. (1986) *A Engenharia do Conhecimento*. In: Sistemas Especialistas – o conhecimento artificial. Rio de Janeiro.
- ITE (1995). *Improving Traffic Signal Operations*. 1^o Edição. Nº IR-081. Washington DC, USA.
- JACQUES, M. A., PURSULA, M, NIITTYMÄKI, J. KOSONEN, I. (2002a) *The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers*. In: The 13th Mini-Euro Conference. Bari.
- JACQUES, M. A., NIITTYMÄKI, J., PURSULA, M. (2002b). *Analyzing Different Fuzzy Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections*. In: TRB 81 st ANNUAL MEETING, Washington DC.
- JACQUES, M. A., PURSULA, M, NIITTYMÄKI, J. KOSONEN, I. (2002c) *Analyzing of different defuzzification methods applied to fuzzy signal controllers*. In: XII Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte. Quito, Equador.
- JANG, J.-S., GULLEY, N. (1995). *Fuzzy Logic Toolbox – For use MATLAB*. Natick, Mauss.: the MathWorks, Inc.
- KELL, J. H.; FULLERTON, I. J. (1991). *Manual of traffic Signal Design*. 2^a Edição. New Jersey, USA.
- KIM, S. (1994). *Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems*. In: PhD Thesis, Polytechnic University. USA.

- KOSONEN, I. (1999). *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications*. Helsinki University of Technology, Transportation Engineering. Publication 100. Finland.
- LEE, C. C. (1990). *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol 20, No. 2.
- MAIOLINO, C. E. G., (1992). *SEIS - Sistema Especialista para implantação de Semáforos*. Dissertação de Mestrado em Transportes. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- McSHANE, W. R.; ROESS, R. P. (1990). *Traffic Flow Fundamentals*. New Jersey, USA.
- MIZUMOTO, M., ZIMMERMANN, H.-J. (1982). *Comparison of fuzzy reasoning methods*. Fuzzy Sets and Systems 8, p.p. 253-283.
- NAKATSUYAMA, M., NAGAHASHI, H., NISHIZUKA, N. (1984). *Fuzzy logic phase controller for traffic junctions in the one-way arterial road*. Proceedings of the IFAC Ninth Triennial World Congress, Pergamon Press, Oxford.
- NIITTYMÄKI, J. (1998). *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control*. Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Publication 94. Finland.
- NIITTYMÄKI, J., PURSULA, M. (1996). *Evaluation of traffic signal control with simulation – a comparison of the Pappis e mamdani fuzzy control vs. vehicle actuation with the extension principle*. In: The Fourth Meeting of the EURO Working Group on Transportation, University of Newcastle, Newcastle upon Tyne, UK.
- NIITTYMÄKI, J., PURSULA, M. (2000). *Signal Control Using Fuzzy Logic*. Fuzzy Sets and Systems. Finland.
- NIITTYMÄKI, J., NEVALA, R. (2001). *Fuzzy Adaptive traffic Signal Control – Principles and Results*. In: Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIS International Conference. Vancouver.
- PAPPIS, C. P., MAMDANI, H. (1977). *A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junction*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. SMC-7, N° 10.
- RODRIGUEZ, J. L. (1999). *Uma Técnica de Previsión para la Incertidumbre: El Método Delphi*. Editora Barcelona. Espanha.
- REIS, A. K. O. (2001). *Análise do efeito da variação do volume de tráfego sobre o desempenho de planos semaforicos de tempo fixo: estudo de caso em São Paulo*. Dissertação de Mestrado em Transportes. Universidade de Brasília. Brasília, DF.
- SAYERS, T., ANDERSON, J., BELL, M. (1998). *Traffic Control System Optimizations: A Multiobjective Approach*. 3rd IMA International Conference on Mathematics in Transport Planning and Control. Cardiff.

- SEBAG, M., SCHOENAUER, M. (1990). *Incremental Learning of Rules and Meta-rules*. 7th International Conference on Machine Learning, R. Porter B. Mooney Eds, Morgan Kaufmann. Austin, Texas.
- SUGENO, M., NISHIDA, M. (1985). *Fuzzy Control of Model Car*. Fuzzy Sets and Systems, Vol. 16.
- TRABIA, M. B., KASEKO, M. S., ANDE, M. (1999). *A Two-stage Fuzzy Logic Controller for Traffic Signals*. Transportation Research Part C.
- TRB – TRANSPORTATION RESEARCH BOARD (2000). *Highway Capacity Manual*. National Research Council, Washington, DC.
- ZADEH, L. A. (1971). *Quantitative Fuzzy Semantics*. Information Sciences 3, p.p. 159-176.
- ZADEH, L. A. (1973). *Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Process*. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-3, N° 1.
- ZIMMERMAN, H.-J. (1996). *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. 3rd Edition. Kluwer Academic Publishers.

APÊNDICE A

Lógica *fuzzy*

A.1 – LÓGICA FUZZY: APRESENTAÇÃO

O termo *fuzzy* foi utilizado originalmente pelo professor Lofti A. Zadeh da Universidade da Califórnia, Berkeley, em 1965, como uma forma de modelar a incerteza da linguagem natural observada no pensamento e julgamento humano. Nos anos 70 surge a primeira aplicação da lógica *fuzzy* na Europa, difundindo-se posteriormente no Japão na década de 80. Ultimamente tem surgido uma grande variedade de aplicações em diversos campos da ciência.

Um dos problemas da ciência é o de definir o quanto já se sabe sobre um determinado assunto e o quanto ainda falta saber. Isto denota o grau de incerteza do conhecimento humano. Além deste aspecto, o grande número de informações disponíveis para processamento, entendimento e interpretação tem crescido exponencialmente nos últimos anos. A união da incerteza do conhecimento com a grande oferta de informações caracteriza a grande complexidade da maioria dos problemas enfrentados pela ciência. Outro aspecto que serve como entrave para a resolução de muitos problemas está relacionado com a dificuldade de representação matemática de fenômenos que não podem, de maneira mais fidedigna, isto é, sem perda de informação, ser adequadamente tratados pela lógica formal do tudo ou nada, ou do sim ou não.

O tratamento da incerteza tem sido motivo de pesquisa por vários autores, sendo utilizadas, dentre várias, a teoria Bayseana e a lógica *fuzzy* na sua abordagem. A lógica *fuzzy* consiste em aproximar a decisão computacional da decisão humana. Isto é feito de forma que a decisão de uma máquina não se resuma a um “sim” ou “não”, mas também tenha decisões “abstratas”, do tipo, “um pouco mais”, “talvez sim” e outras tantas variáveis que representem decisões humanas. Pode ser definida como uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral, descritas em uma linguagem natural (variáveis lingüísticas) e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação pelos computadores. Apresenta-se como uma ferramenta útil para representar o conhecimento e experiência do homem por meio de tratamento matemático. A construção de um sistema de controle *fuzzy* é baseada na idéia de se incorporar experiência ou conhecimento especialista de um operador humano para se obter a melhor estratégia de controle.

A definição dos sistemas de controle baseados em lógica *fuzzy*, controladores *fuzzy*, compreende os seguintes passos: construção de funções de pertinência e base de regras; definição do processo de *fuzzification*, que é o processo de se encontrar o grau de pertinência de um determinado elemento em um conjunto *fuzzy*; avaliação das regras, resultado do processo de avaliação; definição do processo de *defuzzification*, que significa o processo de traduzir os resultados *fuzzy* decorrentes da aplicação das regras do sistema em uma informação numérica.

Para incorporar as variáveis lingüísticas na modelagem são utilizados os conjuntos *fuzzy*, que são definidos por funções de pertinência, combinados em expressões lógicas das regras de avaliação através de operadores *fuzzy*. A seguir faz-se a conceituação de cada um destes elementos.

A.2 – CONJUNTOS FUZZY

Os conjuntos *fuzzy* se caracterizam por aceitar a incerteza proveniente da utilização da linguagem natural e transformá-la em uma linguagem formal em bases matemáticas.

A.2.1 – Definição

Os conjuntos *fuzzy* são definidos como conjuntos de objetos que, apesar de serem compostos por elementos que podem ser representados por números reais (p. ex.: fila formada por 5, 10 ou 15 veículos) não apresentam contornos bem definidos. Isto é, os conjuntos *fuzzy* representam os termos de variáveis lingüísticas (p. ex.: fila pequena, média ou grande) e seus elementos são definidos a partir do universo de discurso da variável. Os conjuntos *fuzzy* são formados pelos elementos propriamente ditos, associados ao grau de pertinência de cada elemento ao conjunto. Dessa forma, um conjunto *fuzzy* deve ser representado através do grau de relação existente entre cada elemento e o conjunto.

Quando se raciocina com base na teoria clássica dos conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto fica bem definido. Os elementos de um conjunto A em um determinado universo W simplesmente pertencem ou não pertencem àquele conjunto. Isto pode ser expresso pela função característica μ_A :

$$\mu_A(w) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente } w \in A \\ 0 & \text{se e somente } w \notin A \end{cases}$$

O conceito de conjunto *fuzzy* é introduzido generalizando-se a função característica de modo que ela possa assumir um número infinito de valores diferentes no intervalo $[0,1]$. A definição de um conjunto *fuzzy* é uma extensão da definição de um conjunto clássico. Sendo assim, um conjunto *fuzzy* A em W é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{(w, \mu_A(w)) \mid w \in W\} \quad (A.1)$$

onde $\mu_A(w)$ é a função de pertinência de w em A e é definida como o mapeamento de W no intervalo fechado $[0,1]$:

$$\mu_A(w): W \rightarrow [0,1] \quad (A.2)$$

Um exemplo de representação de conjuntos *fuzzy* associados aos termos de uma variável lingüística, no caso a variável fila, é apresentada na figura A.1.

Um conjunto *fuzzy* é dito *singleton* quando o seu suporte é um ponto simples em W , com $\mu_A(w) = 1$. A representação gráfica deste conjunto é apresentada na figura A.2.

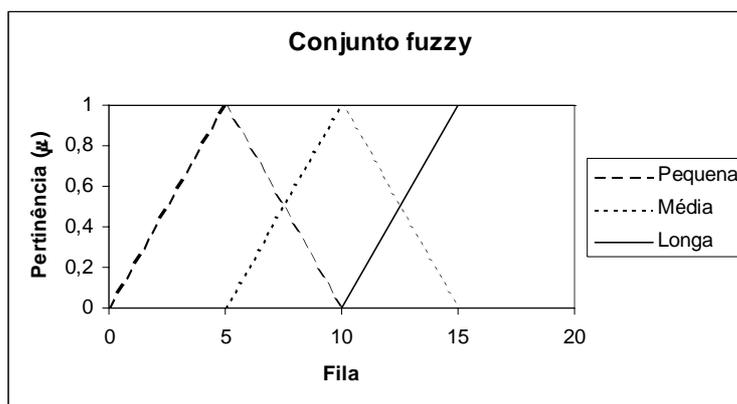


Figura A.1 - Conjuntos *fuzzy* para o caso da variável fila

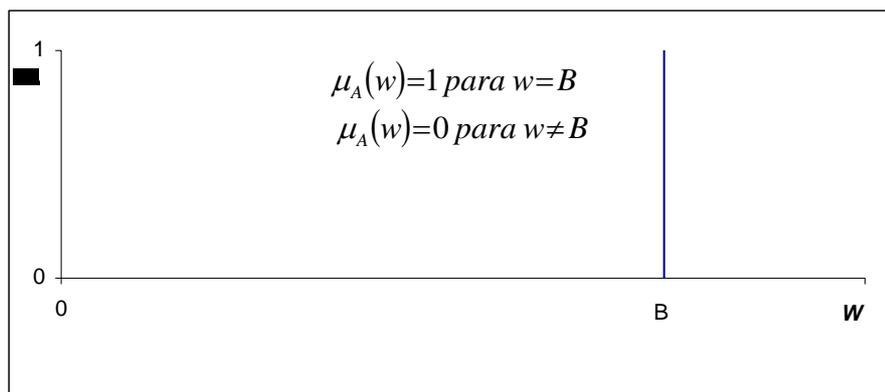


Figura A.2 - Conjunto *fuzzy singleton*

A.2.2 – Função de pertinência

Ao grau com que um elemento pertence a um conjunto *fuzzy* chama-se grau de pertinência. A variação dos graus de pertinência de acordo com o valor de classificação apresentado é denominada função de pertinência. A especificação de funções de pertinência é subjetiva, o que significa que estas, sendo especificadas para um mesmo conceito por pessoas diferentes, podem variar consideravelmente.

As funções de pertinência indicam o quanto um elemento pertence a um dado conjunto e são utilizadas para representar os limites dos conjuntos *fuzzy* pertencentes a uma variável. Pode-se determinar para certa variável a existência de vários conjuntos *fuzzy* (um conjunto para cada um dos termos que a variável pode assumir). Para determinar a forma de variação e os limites de cada um destes conjuntos, deve-se definir uma função de pertinência adequada.

Deve-se ressaltar a diferenciação da classificação *fuzzy* com a função probabilística. A classificação *fuzzy* não fornece a probabilidade de ocorrência de um evento e sim o grau de pertinência em uma determinada classe. A lei das probabilidades se caracteriza pela soma da probabilidade de ocorrência de uma classe com a de não ocorrência desta classe ser igual a 1. Não existe na definição dos conjuntos *fuzzy* relacionados a uma variável sobre determinado universo de discurso, a necessidade de que a soma dos graus de pertinência de cada elemento associados a todos os conjuntos *fuzzy* daquela variável seja igual a 1. Isso pode ser verificado na Figura A3 (Zadeh ,1971).

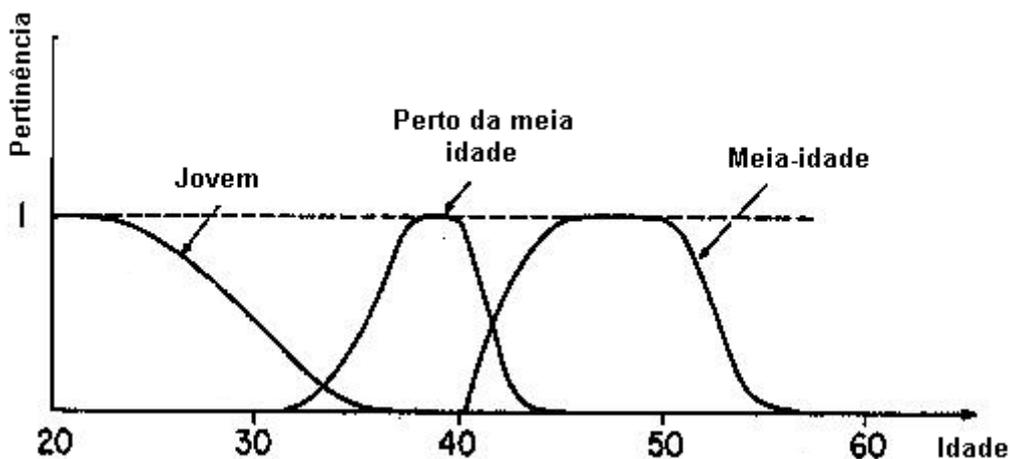
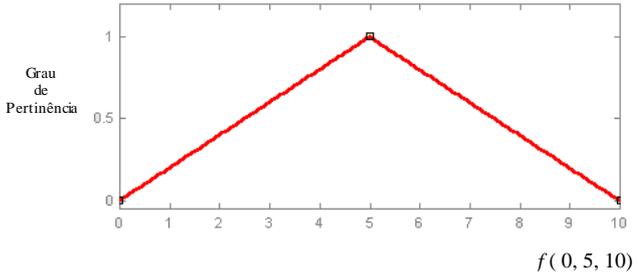
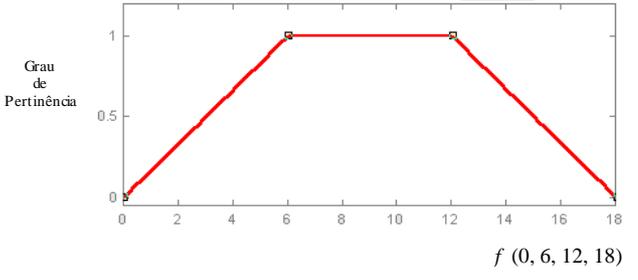
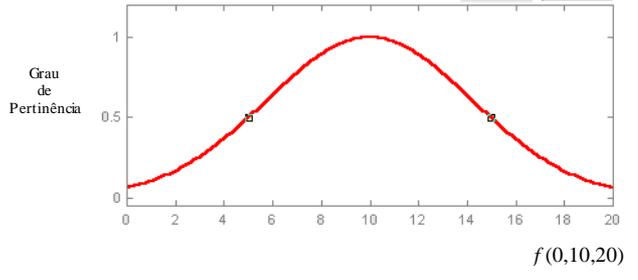


Figura A.3 – Caracterização dos conjuntos *fuzzy* “Jovem”, “Perto da meia-idade” e “Meia-idade” (Zadeh, 1971)

As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* podem assumir diversas formas, sendo as trapezoidal, triangular e normal as mais utilizadas (Ver Tabela A.1). Alguns aplicativos que processam a lógica *fuzzy*, como o MATLAB, ferramenta utilizada neste trabalho, possibilitam a obtenção destas funções parametrizadas, bastando definir os parâmetros de limites dos intervalos adequados.

Tabela A.1 – Funções de pertinência parametrizadas

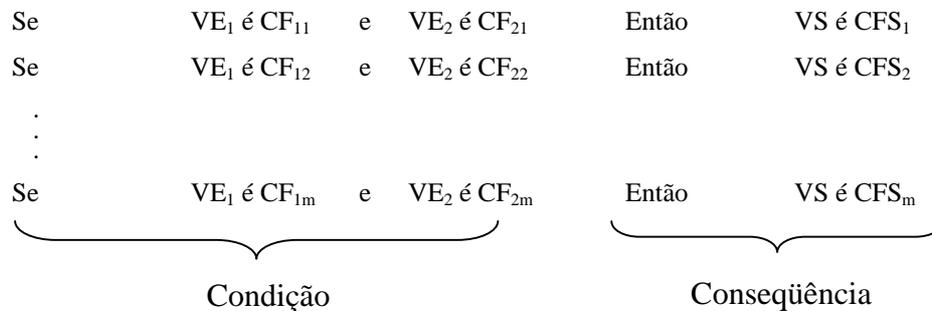
Função	Exemplo
Triangular	
Trapezoidal	
Normal	

A.3 – REGRAS DE AVALIAÇÃO FUZZY

As regras de avaliação compõem a estrutura principal de inferência pela lógica *fuzzy*. As regras relacionam as variáveis de entrada, ou antecedentes, com as de saída, ou conseqüentes, procurando relacioná-las através de regras de causa e efeito. A escolha das regras tem como ponto de partida a análise do processo em si e a experiência dos especialistas que com ele trabalham. Se o profissional especialista colocou regras de boa qualidade, o desempenho do sistema deverá refletir essa qualidade, fazendo inferências com alto grau de acerto e de maneira rápida, dando boas justificativas para suas respostas.

Segundo Lee (1990), as regras *fuzzy* podem ser definidas com base na experiência do operador, no conhecimento do engenheiro de controle, na modelagem *fuzzy* das ações de controle do operador (processo de aprendizagem) e na modelagem *fuzzy* do processo.

Exemplo de regra de causa e efeito é o uso do “Se-Então”. Geralmente, as regras de avaliação utilizadas pela lógica *fuzzy* assumem a seguinte forma: *Se VE é CF Então VS é CFS*. “*VE é CF*” é chamado de antecedente ou premissa da regra, enquanto que “*VS é CFS*” é chamado de conseqüente ou conclusão da regra. Generalizando:



Onde:

VE_1, VE_2, \dots, VE_n – Variáveis de entrada;

VS – Variável de saída;

E – Operador *fuzzy*, por exemplo, “interseção”;

CF_{ij} – Conjuntos *fuzzy* da variável VE_i

Onde: $i=1\dots n$ – identificador da variável; e

$J=1\dots m$ – identificador da ordem do conjunto *fuzzy*.

CFS_j – Conjuntos *fuzzy* da variável VS

Onde: $j=1\dots m$ – identificador da ordem do conjunto *fuzzy*.

Um questionamento que pode ser efetuado refere-se às parte(s) da regra *fuzzy* em que se deve colocar os graus de pertinência. Esta condição depende da necessidade e aplicabilidade de cada problema. Envolve-se aqui a perspicácia do engenheiro de conhecimento de lidar com as variáveis envolvidas em tal problema, juntamente com o auxílio do especialista de domínio. Para um determinado conjunto de regras podem ser colocados os graus de pertinência somente na parte antecedente como também na parte conseqüente da regra. Isto é, pode-se definir o antecedente, o conseqüente, ou ambos, como formados por conjuntos *fuzzy*. Neste sentido, o conjunto *fuzzy singleton* é considerado como valor numérico, não *fuzzy*.

A.4 – OPERADORES FUZZY

Na estruturação das regras *fuzzy* normalmente são encontradas duas ou mais variáveis condicionantes que, combinadas, resultam em determinado efeito. Os valores destas variáveis

são associados às funções de pertinência e para se obter a função resultante é necessária a utilização de algum operador lógico.

De modo semelhante à Teoria Clássica dos Conjuntos, operações foram definidas para os conjuntos *fuzzy*. Estas operações permitem a implementação dos conectores “e” e “ou”, que podem ser usados tanto no antecedente quanto no conseqüente das regras *fuzzy*.

No sentido mais restrito, o conector “e” é implementado pelo operador interseção (mínimo) e os conectores “ou” e “também” pelo operador união (máximo). No entanto, de forma mais ampla, o conector “e” pode ser implementado por uma família de operadores denominados de T-normas (normas triangulares) e os conectores “ou” e “também” por uma família de operadores denominados de T-conormas ou S-normas (conormas triangulares). As T-normas e as S-normas mais utilizadas estão apresentadas abaixo (Lee, 1990):

T-normas

- Interseção $\rightarrow \min(x, y)$
- Produto algébrico $\rightarrow x * y$
- Produto limitado $\rightarrow \max(0, x + y - 1)$
- Produto drástico $\rightarrow \begin{cases} x \rightarrow y = 1 \\ y \rightarrow x = 0 \\ 0 \rightarrow x, y < 1 \end{cases}$

S-normas

- União $\rightarrow \max(x, y)$
- Soma algébrica $\rightarrow x + y - x * y$
- Soma limitada $\rightarrow \min(x + y, 1)$
- Soma drástica $\rightarrow \begin{cases} x \rightarrow y = 0 \\ y \rightarrow x = 0 \\ 0 \rightarrow x, y > 0 \end{cases}$

Estas operações são definidas para $x, y \in [0, 1]$.

Assim, os principais operadores utilizados na teoria dos conjuntos *fuzzy* são:

- Mínimo ou Interseção – a função de pertinência da interseção de dois conjuntos *fuzzy* A e B com funções de pertinência $\mu_A(w)$ e $\mu_B(w)$, respectivamente, é definida como o mínimo das duas funções individuais de pertinência. Isto é chamado o critério mínimo.

$$\mu_{A \wedge B}(w) = \min(\mu_A(w), \mu_B(w)) \quad (\text{A.4})$$

- Máximo ou União – a função de pertinência da união de dois conjuntos *fuzzy* A e B com funções de pertinência $\mu_A(w)$ e $\mu_B(w)$, respectivamente, é definida como o máximo das duas funções individuais de pertinência. Isto é chamado o critério máximo.

$$\mu_{A \vee B}(w) = \max(\mu_A(w), \mu_B(w)) \quad (\text{A.5})$$

- Produto Algébrico – é definido como o produto das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* presentes. Possui o inconveniente da redução crescente do valor de $\mu_{A*B}(w)$, ocasionada pelo produto de dois valores menores ou iguais a 1.

$$\mu_{A*B}(w) = \mu_A(w) * \mu_B(w) \quad (\text{A.6})$$

- Soma Algébrica – é definida como a soma das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* presentes. Permite a associação dos dois critérios e obtém valores crescentes.

$$\mu_{A+B}(w) = \mu_A(w) + \mu_B(w) - \mu_A(w) * \mu_B(w) \quad (\text{A.7})$$

A.5 – FUNÇÃO DE IMPLICAÇÃO FUZZY

A regra de composição para inferência permite inferir a parte conseqüente da regra *fuzzy* a partir da condição da regra. As regras de operação mais comumente utilizadas para implementação da função de implicação são:

- Regra de operação definida por Mamdani (R_c)

$$R_c = \int_{U \times V} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) / (u, v) \quad (\text{A.8})$$

- Regra de operação definida por Larsen (R_p)

$$R_c = \int_{U \times V} \mu_A(u) \mu_B(v) / (u, v) \quad (\text{A.9})$$

Onde A e B são conjuntos *fuzzy* de u e v no universo de discurso U e V . Outras regras de operação foram propostas e analisadas para aplicação de sistemas *fuzzy* (Mizumoto e Zimmermann, 1982). A relação abaixo resume algumas destas:

$$R_C = [\mu_A(u_o) \wedge \mu_B(v)] \text{ (Mamdani)} \quad (\text{A.10})$$

$$R_P = [\mu_A(u_o) \mu_B(v)] \text{ (Larsen)} \quad (\text{A.11})$$

$$R_m = [\mu_A(u_o) \wedge \mu_B(v)] \wedge [1 - \mu_A(u_o)] \text{ (Zadeh)} \quad (\text{A.12})$$

$$R_a = 1 \wedge [1 - \mu_A(u_o) + \mu_B(v)] \text{ (Zadeh)} \quad (\text{A.13})$$

O comportamento do controlador *fuzzy* pode ser caracterizado pela agregação de n diferentes regras *fuzzy*. Isto é feito através do conector “também”, que pode ser implementado por diferentes operadores e produz a relação combinada *fuzzy*.

A.6 – MÉTODOS DE DEFUZZIFICATION

São encontrados na literatura diferentes métodos de *defuzzification* e a escolha de um deles para uma aplicação específica pode ser baseada em justificativas axiomáticas e/ou empíricas (Jacques *et al.*, 2002c). Estes métodos são empregados nos controladores *fuzzy* no processo de *defuzzification*. Dentre eles, podem ser citados:

- Critério máximo (MC) – neste método, a saída com maior valor de grau de pertinência é selecionada. A ação de controle (z_o) pode ser representada por:

$$z_o = \{w_k / \mu_c(w_k = \max(\mu_c(w), \text{para todo } w \in W)\} \quad (\text{A.14})$$

Onde C é a consequência estimada a partir do conjunto completo de regras de controle *fuzzy*, w pertence ao universo de discurso W e μ_c é a função de pertinência de C

- Método do centro de gravidade (COG) – seleciona o valor que representa o centro de gravidade da distribuição de possibilidade para a ação de controle. É dado pela fórmula:

$$z_o = \frac{\int_w \mu_c(w) w d_w}{\int_w \mu_c(w) d_w} \quad (\text{A.15})$$

- Bissetor da área – por este método z_o é representado por uma linha vertical que divide C em duas regiões de mesma área. Para isto, z_o deve satisfazer a seguinte relação:

$$\int_{\alpha}^{z_o} \mu_c(w) d_w = \int_{z_o}^{\beta} \mu_c(w) d_w \quad (\text{A.16})$$

Onde: $\alpha = \min \{w / w \in W\}$ e $\beta = \max \{w / w \in W\}$

- Média dos valores máximos (MOM) – é indicado o valor médio de todos os valores de saída onde a função de pertinência atinge um máximo. Matematicamente pode ser expresso da seguinte forma:

$$z_o = \frac{\sum_{j=1}^m w_j}{m} \quad (\text{A.17})$$

Onde w_j é o j -ésimo valor de saída onde o grau da função de pertinência atinge um máximo e m é o número de $w \in W$ onde o valor da função de pertinência atinge um máximo.

- Mínimo do máximo (SOM) – escolhe o menor valor de saída dentre os valores onde a função de pertinência atinge um máximo.

APÊNDICE B

Resultados referentes a cada uma das alterações a ser testada – Planilhas de controle e superfícies de controle

Tabela B.1 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 02 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Fila - Número de veículos	0	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	
	1	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	32	41	46	48	48	60	69	77	84	86	99	111	122	134	150	150	150	150	150	150	150
	6	16	32	41	44	45	45	56	65	72	77	79	91	102	114	129	143	143	143	143	143	143	143
	7	16	32	41	43	42	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	140	140	140	140	140	140	140
	8	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	9	16	32	41	43	42	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	140	140	140	140	140	140	140
	10	16	32	41	44	45	45	56	65	72	77	79	91	102	114	129	143	143	143	143	143	143	143
	11	16	32	41	43	42	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	140	140	140	140	140	140	140
	12	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	13	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	14	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	15	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	16	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	17	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	18	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	19	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	20	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139

Tabela B.2 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 03 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Fila - Número de veículos	0	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	
	1	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	6	16	35	44	48	49	63	74	84	88	105	119	132	146	152	152	152	152	152	152	152	152	152
	7	16	35	44	46	46	60	70	79	81	97	110	126	146	146	146	146	146	146	146	146	146	146
	8	16	35	44	43	44	57	68	75	78	92	107	124	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
	9	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	10	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	11	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	12	16	35	44	43	44	57	68	75	78	92	107	124	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
	13	16	35	44	43	44	57	68	75	78	92	107	124	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
	14	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	15	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	16	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	17	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	18	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	19	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	20	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139

Tabela B.3 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o caso 04 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Fila - Número de veículos	0	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	
	1	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	35	44	48	48	63	73	83	86	102	116	129	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	6	16	35	44	45	45	59	68	76	79	94	107	125	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
	7	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	8	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	9	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	10	16	35	44	45	45	59	68	76	79	94	107	125	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
	11	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	12	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	13	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	14	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	15	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	16	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	17	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	18	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	19	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	20	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139

Tabela B.4 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 05 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Fila - Número de veículos	0	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	
	1	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	6	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	162	162	162	162	162	162	162
	7	16	32	41	46	49	49	61	70	78	87	90	103	115	126	137	153	153	153	153	153	153	153
	8	16	32	41	46	47	47	59	68	75	81	83	96	107	118	132	148	148	148	148	148	148	148
	9	16	32	41	44	45	45	56	65	72	77	79	91	102	114	129	143	143	143	143	143	143	143
	10	16	32	41	43	43	43	54	63	71	75	77	88	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	11	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	12	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	13	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	14	16	32	41	43	43	43	54	63	71	75	77	88	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	15	16	32	41	44	45	45	56	65	72	77	79	91	102	114	129	143	143	143	143	143	143	143
	16	16	32	41	43	43	43	54	63	71	75	77	88	99	113	127	141	141	141	141	141	141	141
	17	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	18	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	19	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139
	20	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	139	139	139	139	139	139	139

Tabela B.5 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 06 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fila - Número de veículos	0	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	1	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	2	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	3	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	4	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	5	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	6	16	30	38	44	47	49	49	59	67	74	80	87	88	100	110	119	128	138	152	152	152
	7	16	30	38	44	46	46	46	56	64	70	76	80	81	92	101	110	120	133	146	146	146
	8	16	30	38	44	43	43	44	53	60	68	73	76	78	87	96	107	118	130	141	141	141
	9	16	30	38	44	42	42	42	51	60	68	72	74	76	85	95	107	118	128	139	139	139
	10	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	11	16	30	38	44	42	42	42	51	60	68	72	74	76	85	95	107	118	128	139	139	139
	12	16	30	38	44	43	43	44	53	60	68	73	76	78	87	96	107	118	130	141	141	141
	13	16	30	38	44	43	43	44	53	60	68	73	76	78	87	96	107	118	130	141	141	141
	14	16	30	38	44	42	42	42	51	60	68	72	74	76	85	95	107	118	128	139	139	139
	15	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	16	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	17	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	18	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	19	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	20	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139

Tabela B.6 - Planilha de controle - Extensão de tempo de verde dada para o Caso 07 (*10 seg)

		Chegada - Número de veículos																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Fila - Número de veículos	0	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	1	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	2	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	3	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	4	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	5	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	6	16	30	38	44	47	49	50	60	68	75	82	90	100	112	122	132	141	151	162	162	162
	7	16	30	38	44	47	49	49	59	67	74	81	88	90	101	111	121	130	139	153	153	153
	8	16	30	38	44	47	47	47	57	65	72	78	82	83	94	104	113	121	134	148	148	148
	9	16	30	38	44	44	45	45	55	62	68	74	78	79	89	98	107	119	131	143	143	143
	10	16	30	38	44	42	43	43	52	60	68	72	76	77	86	95	107	118	129	141	141	141
	11	16	30	38	44	42	41	42	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	12	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	13	16	30	38	44	42	41	42	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	14	16	30	38	44	42	43	43	52	60	68	72	76	77	86	95	107	118	129	141	141	141
	15	16	30	38	44	44	45	45	55	62	68	74	78	79	89	98	107	119	131	143	143	143
	16	16	30	38	44	42	43	43	52	60	68	72	76	77	86	95	107	118	129	141	141	141
	17	16	30	38	44	42	41	42	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	18	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	19	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139
	20	16	30	38	44	42	41	41	51	60	68	72	74	75	85	95	107	118	128	139	139	139

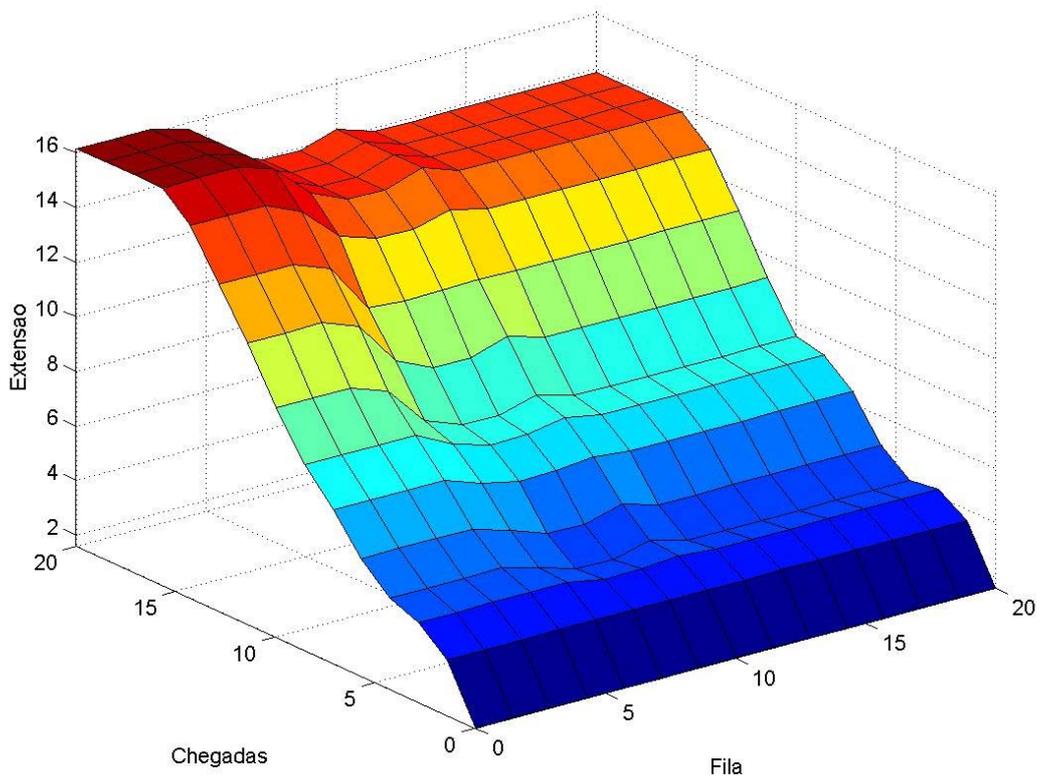


Figura B.1 – Superfície de controle – Caso 02

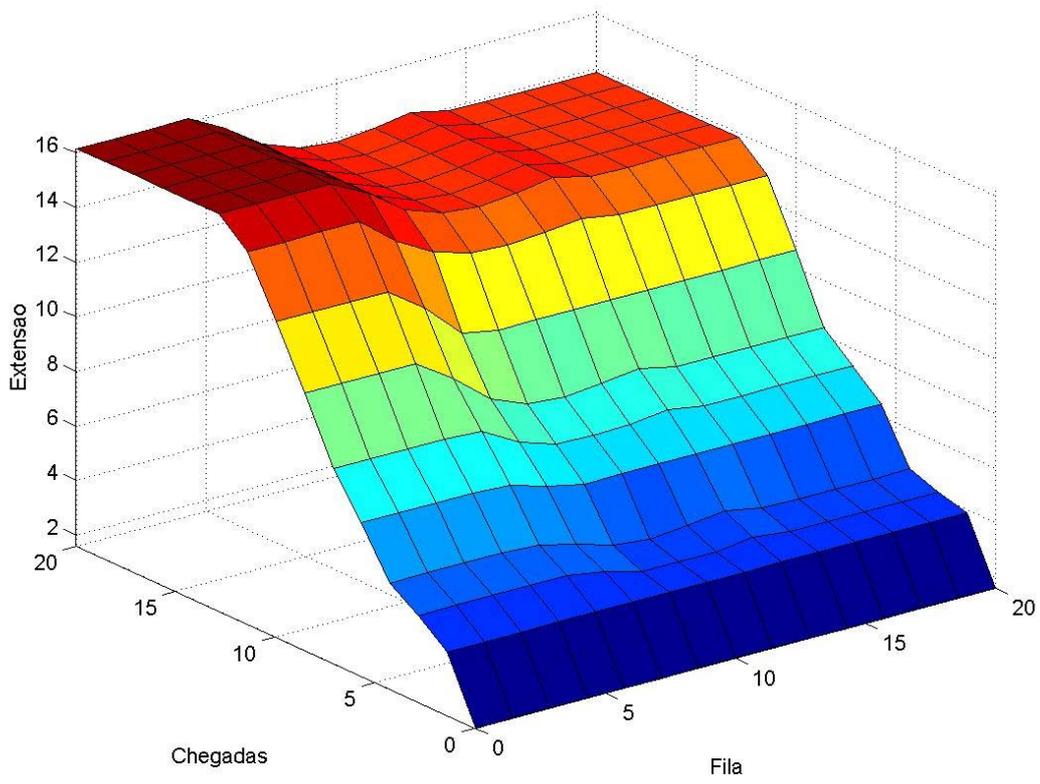


Figura B.2 – Superfície de controle – Caso 03

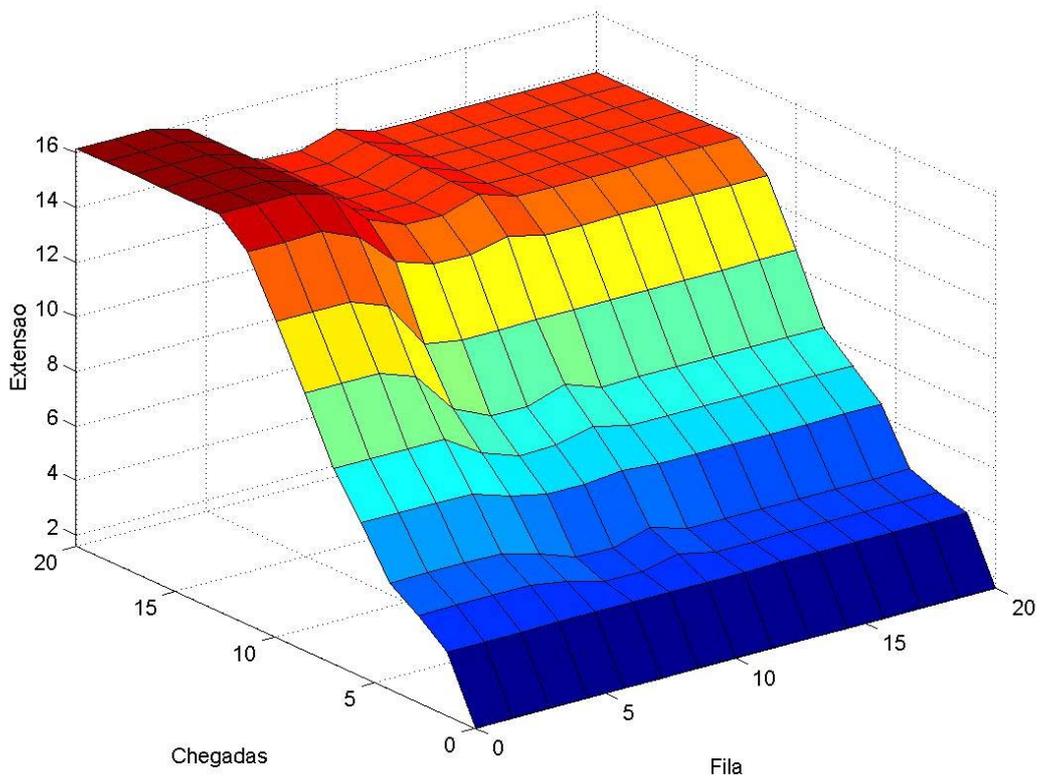


Figura B.3 – Superfície de controle – Caso 04

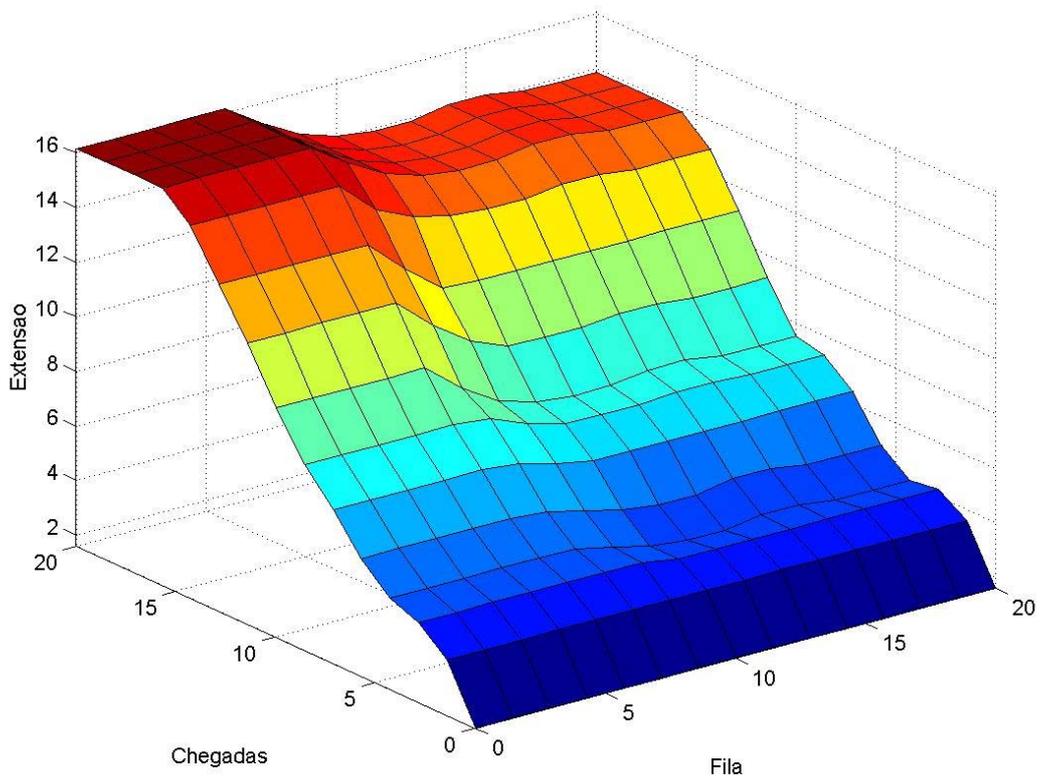


Figura B.4 – Superfície de controle – Caso 05

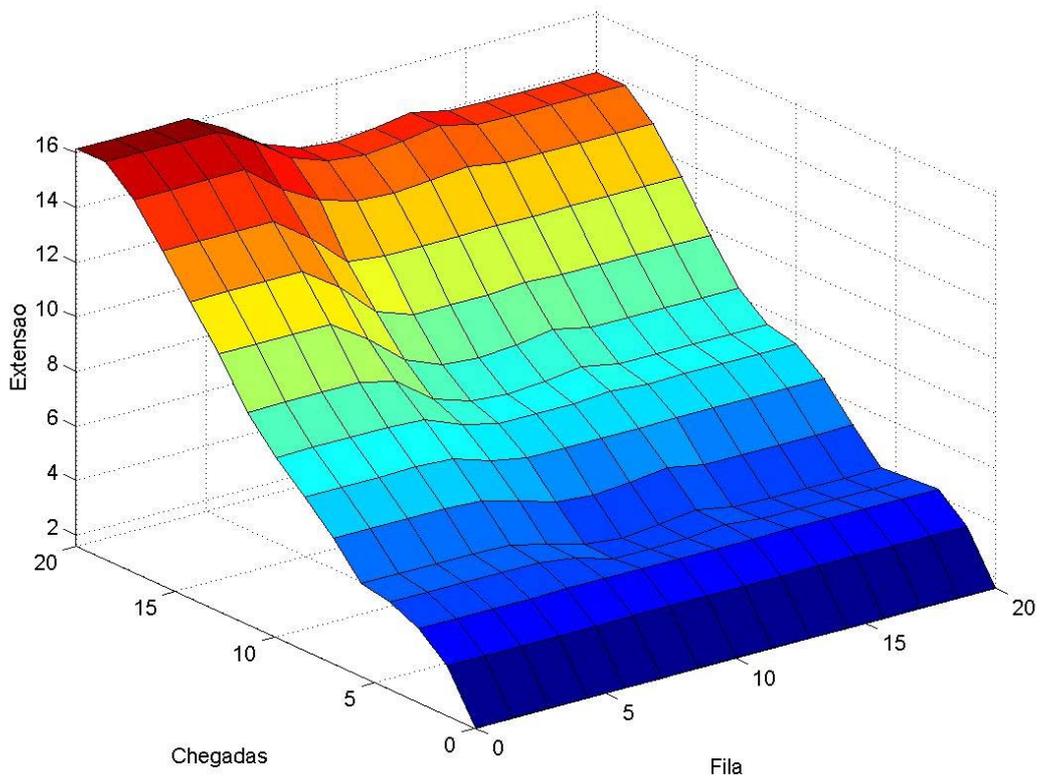


Figura B.5 – Superfície de controle – Caso 06

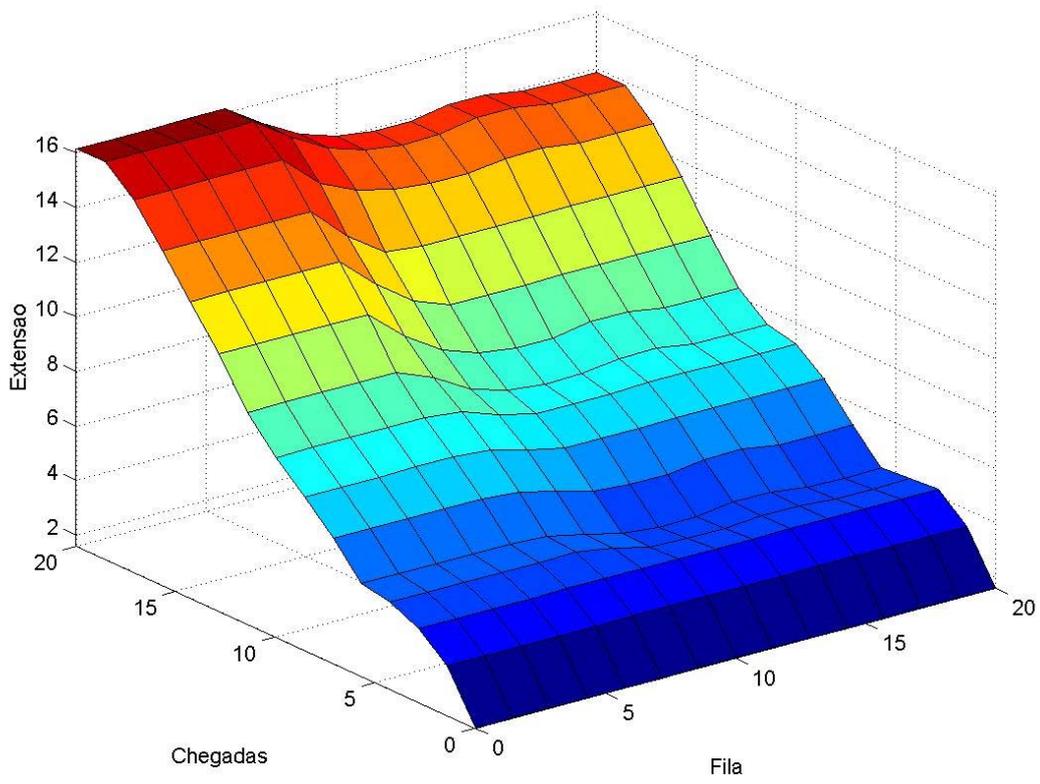


Figura B.6 – Superfície de controle – Caso 07

APÊNDICE C
Questionário aplicado aos especialistas

Para cada situação apresentada, considere:

- As vias que se interceptam têm a mesma prioridade (duas vias principais);
- A interseção opera de forma isolada (não sofre interferências das interseções adjacentes);
- Cada aproximação possui somente uma faixa de trânsito;
- A extensão máxima admissível para a fila é a indicada na figura;
- A fila em movimento já está recebendo VERDE há 30 segundos.

De acordo com as informações acima, observe as filas no cruzamento e responda as questões preenchendo o quadro correspondente:

Questão 1: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERDE (fila em movimento)?

Questão 2: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERMELHA (fila parada)?

Questão 3: Admitindo que já se passaram 30 segundos de VERDE, responda: Você estenderia o VERDE por um período de tempo curto, médio ou longo? Quantos veículos seriam servidos nesse tempo adicional?

Nº de ordem	Questão 1			Questão 2			Questão 3			Número de veículos que seriam servidos:
	A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERDE é:			A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERMELHA é:			O tempo de VERDE será estendido por um tempo:			
	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média	Grande	Curto	Médio	Longo	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
8										
9										
10										
11										
12										
13										
14										
15										
16										
17										
18										
19										
20										
21										
22										
23										
24										
25										

Para cada situação apresentada, considere:

- As vias que se interceptam têm a mesma prioridade (duas vias principais);
- A interseção opera de forma isolada (não sofre interferências das interseções adjacentes);
- Cada aproximação possui somente uma faixa de trânsito;
- A extensão máxima admissível para a fila é a indicada na figura;
- A fila em movimento já está recebendo VERDE há 30 segundos.

De acordo com as informações acima, observe as filas no cruzamento e responda as questões preenchendo o quadro correspondente:

Questão 1: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERDE (fila em movimento)?

Questão 2: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERMELHA (fila parada)?

Questão 3: Admitindo que já se passaram 30 segundos de VERDE, responda: Você estenderia o VERDE por um período de tempo curto, médio ou longo? Quantos veículos seriam servidos nesse tempo adicional?

Nº de ordem	Questão 1			Questão 2			Questão 3			Número de veículos que seriam servidos:
	A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERDE é:			A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERMELHA é:			O tempo de VERDE será estendido por um tempo:			
	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média	Grande	Curto	Médio	Longo	
26										
27										
28										
29										
30										
31										
32										
33										
34										
35										
36										
37										
38										
39										
40										
41										
42										
43										
44										
45										
46										
47										
48										
49										
50										

Para cada situação apresentada, considere:

- As vias que se interceptam têm a mesma prioridade (duas vias principais);
- A interseção opera de forma isolada (não sofre interferências das interseções adjacentes);
- Cada aproximação possui somente uma faixa de trânsito;
- A extensão máxima admissível para a fila é a indicada na figura;
- A fila em movimento já está recebendo VERDE há 30 segundos.

De acordo com as informações acima, observe as filas no cruzamento e responda as questões preenchendo o quadro correspondente:

Questão 1: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERDE (fila em movimento)?

Questão 2: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERMELHA (fila parada)?

Questão 3: Admitindo que já se passaram 30 segundos de VERDE, responda: Você estenderia o VERDE por um período de tempo curto, médio ou longo? Quantos veículos seriam servidos nesse tempo adicional?

Nº de ordem	Questão 1			Questão 2			Questão 3			Número de veículos que seriam servidos:
	A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERDE é:			A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERMELHA é:			O tempo de VERDE será estendido por um tempo:			
	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média	Grande	Curto	Médio	Longo	
51										
52										
53										
54										
55										
56										
57										
58										
59										
60										
61										
62										
63										
64										
65										
66										
67										
68										
69										
70										
71										
72										
73										
74										
75										

Para cada situação apresentada, considere:

- As vias que se interceptam têm a mesma prioridade (duas vias principais);
- A interseção opera de forma isolada (não sofre interferências das interseções adjacentes);
- Cada aproximação possui somente uma faixa de trânsito;
- A extensão máxima admissível para a fila é a indicada na figura;
- A fila em movimento já está recebendo VERDE há 30 segundos.

De acordo com as informações acima, observe as filas no cruzamento e responda as questões preenchendo o quadro correspondente:

Questão 1: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERDE (fila em movimento)?

Questão 2: Como você classifica o tamanho da fila na aproximação que está com indicação VERMELHA (fila parada)?

Questão 3: Admitindo que já se passaram 30 segundos de VERDE, responda: Você estenderia o VERDE por um período de tempo curto, médio ou longo? Quantos veículos seriam servidos nesse tempo adicional?

Nº de ordem	Questão 1			Questão 2			Questão 3			Número de veículos que seriam servidos:
	A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERDE é:			A quantidade de veículos na aproximação que está recebendo indicação VERMELHA é:			O tempo de VERDE será estendido por um tempo:			
	Pequena	Média	Grande	Pequena	Média	Grande	Curto	Médio	Longo	
76										
77										
78										
79										
80										
81										
82										
83										
84										
85										
86										
87										
88										
89										
90										
91										
92										
93										
94										
95										
96										
97										
98										
99										
100										

