

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

ESTUDO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA CONJUNTOS *FUZZY*
UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

ALESSANDRO MÁRCIO VAZ

ORIENTADOR: MARIA ALICE P. JACQUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES

PUBLICAÇÃO:2006

BRASÍLIA / DF: MARÇO / 2006

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

ESTUDO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA CONJUNTOS *FUZZY*
UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

ALESSANDRO MÁRCIO VAZ

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, Ph.D (UnB)
(ORIENTADOR)

PAULO CESAR MARQUES DA SILVA, Ph.D (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

CARLOS FELIPE GRANGEIRO LOUREIRO, Ph.D (UFC)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE MARÇO DE 2006.

FICHA CATALOGRÁFICA

VAZ, ALESSANDRO MÁRCIO

Estudos das Funções de pertinência para conjuntos *fuzzy* utilizados em Controladores Semafóricos *Fuzzy* [Distrito Federal] 2005.

xvii, XXXp., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transportes, 2006).

Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Lógica *Fuzzy*

2. Funções de Pertinência

3. Controladores semafóricos

4. Controladores Semafóricos *Fuzzy*

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

VAZ, A. M. (2006). Estudos das Funções de pertinência para conjuntos *fuzzy* utilizados em Controladores Semafóricos *Fuzzy*, Publicação T.DM – 005A/2006, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 158p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Alessandro Márcio Vaz

TÍTULO: Estudo das Funções de pertinência para conjuntos *fuzzy* utilizados em Controladores Semafóricos *Fuzzy*

GRAU: Mestre

ANO: 2006

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 dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Alessandro Márcio Vaz

AC 01, 02 Ed. Via Araguaia.

92 810 200 – Brasília – DF – Brasil.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Wânia,
aos meus filhos, aos meus pais, Arnaldo e Celia e as minhas avós.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a oportunidade de vivenciar e ultrapassar mais esta etapa de minha vida.

À minha esposa Wânia por todo apoio e colaboração durante todas as etapas deste trabalho.

À Professora Maria Alice pela orientação e pelo exemplo de postura profissional.

Ao professor Hemar Godinho pelo apoio fundamental para a realização desta pesquisa.

Aos colegas de turma (Leandro “Careca”, Leandro “Sertanejo”, Mariane, João, Ana Paula, Aline, Frederico, Gil, André, Ricardo, e Mônica).

Aos colegas (Michelle, Ítalo, Geisa, Érica “graduação”, Júlio, André, André “Paraíba”, Alan, Aline, Sandra, Tânia, Clarice, Leonardo, Artur, Félix) e aos professores (Paulo César e Adelaida) pelo apoio e amizade.

E a minha família, por tudo!

RESUMO

ESTUDO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA PARA CONJUNTOS *FUZZY* UTILIZADOS EM CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

As pesquisas com controladores semafóricos *fuzzy* foram iniciadas em 1977, com o trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani. Os trabalhos posteriores relacionados a esse tipo de controlador *fuzzy* conservaram as formas das funções de pertinência utilizadas no primeiro trabalho, quais sejam, as triangulares e as trapezoidais. Isto é, apesar da teoria dos conjuntos *fuzzy* admitir diferentes funções para a representação da pertinência de elementos dos conjuntos *fuzzy*, este aspecto ainda não foi devidamente estudado nas aplicações voltadas ao controle semafórico.

Nesse contexto, este trabalho se dedica a estudar a influência exercida pelo tipo das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* sobre a resposta do controlador semafórico *fuzzy* e sobre o correspondente desempenho do tráfego. Para tanto foram desenvolvidos cinco controladores alternativos ao controlador padrão, que usa funções triangulares e trapezoidais e tem como método de defuzzificação o Centro de Gravidade (COG). Esses controladores diferem do controlador padrão somente em termos da forma das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy*. A avaliação foi então realizada através de um estudo controlado de simulação da operação do tráfego em uma interseção isolada. Para este estudo foram simulados três níveis de volume de tráfego, sendo adotadas como medidas de desempenho do tráfego o atraso médio por ciclo e a porcentagem de veículos parados. A resposta do controlador foi avaliada por meio da duração do tempo de verde de cada fase e do tempo de ciclo. Um estudo complementar também foi realizado para investigar se o impacto das alterações das funções de pertinência nos valores dos resultados das variáveis de controle era afetado significativamente pelo método de defuzzificação pré-definido.

A análise estatística dos resultados das simulações mostrou que a forma das funções de pertinência impacta significativamente a resposta do controlador e o desempenho do tráfego, e que esse impacto depende do método de defuzzificação utilizado.

ABSTRACT

STUDY OF MEMBERSHIP FUNCTIONS IN *FUZZY* SETS USED IN *FUZZY* SIGNAL CONTROLLERS

Research on *fuzzy* signal controllers began in 1977 with pioneer work by Pappis and Mamdani. Future work related to this type of *fuzzy* controller maintained triangular and trapezoidal membership functions used in initial research. This is so although it is possible in *fuzzy* set theory to apply different functions in representing *fuzzy* sets' pertinency elements. These functions have not yet been studied in applications geared toward signal control.

In light of the above, this research sought to study the influence exerted by the type of *fuzzy* set membership functions on *fuzzy* signal controllers and the subsequent effect on traffic performance. Thus, five controllers were developed, alternative to the standard controller that uses triangular and trapezoidal functions and the Centre of Gravity (COG) defuzzification method. These controllers differed from the standard controller only in terms of the form of membership functions for the *fuzzy* set. An assessment was therefore carried out through a controlled simulation study of traffic flow at an isolated intersection. For such, three levels of traffic volume were simulated. The criteria adopted in measuring traffic performance were the average delay per cycle and the percentage of halted vehicles. The controller's response was measured in terms of the duration of green time for each phase as well as of the cycle length. An additional study was also conducted so as to investigate whether or not the impact of alterations to membership functions on the values of results from the control variables was significantly affected by the pre-defined defuzzification method.

A statistical analysis of the simulation results indicated that the form of membership functions impacts significantly upon traffic performance. This impact depends moreover on the traffic defuzzification method used.

SUMÁRIO

Study of Membership Functions in <i>Fuzzy</i> sets used in <i>Fuzzy</i> Signal Controllers	vii
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	2
1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	3
1.4 JUSTIFICATIVA	3
1.5 HIPÓTESE	4
1.6 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO	5
2 LÓGICA FUZZY	6
2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	6
2.1.1 LÓGICA CLÁSSICA	7
2.1.2 LÓGICA SIMBÓLICA	7
2.2 ELEMENTOS DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	10
2.2.1 Variáveis Linguísticas	10
2.2.2 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	11
2.2.3 Inferência <i>Fuzzy</i>	22
2.3 Controladores <i>Fuzzy</i>	23
2.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS	24
3 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS <i>FUZZY</i>	25
3.1 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS	25
3.2 Conceitos Gerais	26
3.2.1 Classificação dos Controladores Semafóricos	27
3.2.2 Princípio da Extensão	28
3.3 Modelos de Controle Semafórico por demanda de tráfego	29
3.4 ESTRUTURA GERAL DE UM CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	34
3.4.1 Interface de Fuzificação	35
3.4.2 Base de Conhecimento	36
3.4.3 Lógica de Tomada de Decisão	36
3.4.4 Processo de Defuzificação	37
3.5 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS <i>FUZZY</i>	37
3.5.1 Controlador de Chiu	40
3.5.2 Controlador de Czogalla	41
3.5.3 Controlador de Favilla	42
3.5.4 Controlador de Gadêlha	43
3.5.5 Controlador de Trabia	44
3.5.6 Controlador de Niittymäki e Pursula	45
3.5.7 Controlador usado em estudos sobre Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i>	46
3.6 Tópicos Conclusivos	47
4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	49
4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS	49
4.2 TIPOS DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA	50
4.2.1 Função de Pertinência Triangular (trimf)	54
4.2.2 Função de Pertinência Trapezoidal (trapmf)	55
4.2.3 Função de Pertinência Forma de “Z” (zmf)	56
4.2.4 Função de Pertinência Forma de “S” (smf)	57
4.2.5 Função de Pertinência Forma de “ π ” (pimf)	58
4.2.6 Função de Pertinência Gaussiana. (gaussmf)	59
4.2.7 Função de Pertinência Forma de Sino (gbellmf)	61
4.2.8 Função de Pertinência Sigmoidal (sigmf)	62

4.2.9	Função de Pertinência Composta pela Diferença entre duas Sigmoidais....	66
	(dsigmf)	66
4.2.10	Função de Pertinência Combinação de duas Funções Gaussianas.	68
	(Gauss2mf)	68
4.2.11	Função Produto entre duas Funções Sigmoidais (Psigmf)	71
4.3	RAZÕES QUE JUSTIFICAM A UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO TRIANGULAR EM PROCESSOS DE MODELAGEM FUZZY	73
4.4	TÓPICOS CONCLUSIVOS DO CAPÍTULO	83
5	ESTUDO DO IMPACTO DAS DIFERENTES FORMAS DE FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA SOBRE o CONTROLADOR semafórico fuzzy	85
5.1	INTERSEÇÃO BÁSICA UTILIZADA NO ESTUDO	86
5.2	CARACTERIZAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY BÁSICO NO MATLAB	86
5.3	DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TESTADAS NOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY	88
5.4	MÉTODOS DE DEFUZIFICAÇÃO	95
5.5	SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO PARA CADA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO E VOLUME	99
5.6	ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INTERAÇÃO DOS FATORES: FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA, VOLUME E TIPO DE DEFUZIFICAÇÃO	120
5.7	TÓPICOS CONCLUSIVOS	126
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	129
6.1	INTRODUÇÃO	129
6.2	CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS	129
6.3	VERIFICAÇÃO DE HIPÓTESE	130
6.4	PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS	130
6.5	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	133
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	134
	ANEXO A – SUPERFÍCIES DE CONTROLE	137
	ANEXO B – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM O HUTSIM	144
	ANEXO C – VALORES DA ANOVA	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Composição das relações <i>fuzzy</i> P e Q.....	21
Tabela 2.2: Tabela verdade das proposições “A” e “B”.....	22
Tabela 2.3: Ilustração das regras de implicação <i>fuzzy</i>	23
Tabela 3.1: Características do controlador semafórico de Pappis e Mamdani (1977).....	39
Tabela 3.2: Características do controlador semafórico de Chiu.....	40
Tabela 3.3: Características do controlador semafórico de Czogalla	42
Tabela 3.4: Características do Controlador Semafórico de Favilla.....	43
Tabela 3.5: Características do Controlador semafórico de Gadêlha	44
Tabela 3.6: Características do controlador semafórico de Trabia	45
Tabela 3.7: Características do controlador semafórico de Niittymäki e Pursula	46
Tabela 3.8: Regras <i>fuzzy</i> implementadas no controlador de estudo	47
Tabela 4.1: Funções de Pertinência disponibilizadas no MATLAB	51
Tabela 4.2: Pertinência, caso 1	76
Tabela 4.3: Defuzificação e o erro, caso 1	77
Tabela 4.4: Pertinência, caso 2	77
Tabela 4.5: Defuzificação e o erro, caso 2	78
Tabela 4.6: Pertinência, caso 3	78
Tabela 4.7: Defuzificação e o erro, caso 3	79
Tabela 4.8: Pertinência, caso 4	80
Tabela 4.9: Defuzificação e o erro, caso 4	80
Tabela 4.10: Pertinência, caso 5	81
Tabela 4.11: Defuzificados e o erro, caso 5	82
Tabela 4.12: Pertinência caso 6	82
Tabela 4.13: Defuzificação e o erro, caso 6	83
Tabela 5.1: Níveis de volume de tráfego.....	86
Tabela 5.2: Intervalos de variação dos conjuntos <i>fuzzy</i>	87
Tabela 5.3: Funções alternativas para substituir as triangulares e trapezoidais em um controlador semafórico <i>fuzzy</i>	89
Tabela 5.4: Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para a variáveis fila, chegada e extensão.....	92
Tabela 5.5: Planilha de controle – Extensão do tempo de verde para o controlador do Caso1C	94
Tabela 5.6: Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume alto	101
Tabela 5.7 Controladores que utilizaram o método COG no volume alto	102
Tabela 5.8 Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume médio.....	104
Tabela 5.9: Controladores que utilizaram o método COG no volume médio	105
Tabela 5.10 Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume baixo.....	107
Tabela 5.11 Controladores que utilizaram o método COG no volume baixo	108
Tabela 5.12: Controladores com menores resultados para as medidas de	111
Tabela 5.13: Defuzificação BIS Volume: Alto	113
Tabela 5.14: Defuzificação BIS Volume: Médio	113
Tabela 5.15: Defuzificação BIS Volume: Baixo	114
Tabela 5.16: Defuzificação COG Volume: Alto	114
Tabela 5.17: Defuzificação COG Volume: Médio	115
Tabela 5.18: Defuzificação COG Volume: Baixo.....	115
Tabela 5.19: Resumo do desempenho dos controladores com a defuzificação BIS.	117
Tabela 5.20: Resumo do desempenho dos controladores com a defuzificação COG	118
Tabela 5.21: Comparação entre todos os controladores estudados	119

Tabela 5.22: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: função de pertinência (FP) e método de defuzificação (MD).....	122
Tabela 5.23: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: FP, MD e volume	124
Tabela 6.1: Relação dos melhores controladores para as variáveis estudadas	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Pertinência “fuzzy” versus Pertinência abrupta (Azevedo <i>et al.</i> , 2000).....	12
Figura 2.2 Conjunto A original e modificado	17
Figura 2.3: Diagrama Sagital	19
Figura 2.4: Representação das relações binárias “P” e “Q”	21
Figura 3.1: Esquema de intervalos de fase atuados (adaptado de Kell e Fullerton, 1991)...	28
Figura 3.2: Esquema de um Controlador fuzzy	35
Figura 4.1: Função Triangular.....	54
Figura 4.2: Função Trapezoidal	55
Figura 4.3: Função Forma de Z.....	56
Figura 4.4: Função Forma de S	57
Figura 4.5: Função forma de π	58
Figura 4.6: Função Gaussiana	59
Figura 4.7: Função Forma de Sino	61
Figura 4.8: Variações quanto a forma da função Sigmoidal	64
Figura 4.9: Função Sigmoidal	65
Figura 4.10: Variações do gráfico da função Diferença entre duas Sigmoidais	66
Figura 4.11: Funções Sigmoidais crescente e decrescente.....	67
Figura 4.12: Função Diferença entre duas Sigmoidais	68
Figura 4.13: Variações, quanto à forma, da função combinação de duas Gaussianas	69
Figura 4.14: Função gaussiana com ponto de máximo em (0, f(0)).....	69
Figura 4.15: Função Combinação de duas gaussianas	71
Figura 4.16: Variações, quanto a forma, da função produto de duas Sigmoidais.....	73
Figura 4.17: Conjuntos triangulares com sobreposição abaixo da imagem $\frac{1}{2}$ (caso 1)..	76
Figura 4.18: Conjuntos triangulares com sobreposição na imagem igual a $\frac{1}{2}$ (a), (caso 2)	77
Figura 4.19: Conjuntos triangulares com sobreposição acima da imagem $\frac{1}{2}$	78
Figura 4.20: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição abaixo da.....	79
Figura 4.21: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição na imagem $\frac{1}{2}$	81
Figura 4.22: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição acima da.....	82
Figura 5.1: Funções de pertinência associadas aos valores da variável “chegada”	91
Figura 5.2: Superfície de controle – Controlador 1C	92
Figura 5.3: Superfícies do controlador que utilizaram as funções triangular e.....	98
Figura 5.4: Resultado da resposta dos controladores com defuzzificação Bissetor e.....	103
Figura 5.5: Resultado da resposta dos controladores com defuzzificação Bissetor e.....	106
Figura 5.6: Resultado da resposta dos controladores com defuzzificação Bissetor e.....	109

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O tráfego nas grandes cidades tem se constituído num dos grandes problemas para a sociedade moderna. Nas grandes metrópoles, principalmente, onde a circulação de veículos automotores é intensa, os índices de acidentes, poluição, consumo de combustível e atrasos totais do tráfego são consideravelmente elevados.

O controle semafórico é uma técnica bastante eficiente para o controle de tráfego em interseções. Dentre os objetivos principais de sua utilização, pode-se destacar a redução da poluição sonora e do ar, a minimização do atraso total do tráfego, a promoção da circulação segura de veículos e pedestres e, por último, a eliminação da necessidade da ampliação constante do sistema viário para o atendimento da demanda (Jacques *et al.*, 2002a).

A busca pela consecução dos diferentes objetivos do controle do tráfego, alguns deles conflitantes, tem levado ao desenvolvimento de diversos métodos de controle semafórico. Dentre os métodos de controle semafórico pode-se citar os controladores com tempos pré-estabelecidos para determinadas partes do dia e os semáforos atuados, que respondem de formas diferentes às solicitações do tráfego devido a medições realizadas “in loco”. Além disso, as interseções podem ser controladas de forma isolada ou em rede aberta ou fechada.

Nas interseções isoladas, assim entendidas aquelas que operam de forma independente, sem qualquer coordenação com interseções adjacentes, diferentes estratégias vêm sendo adotadas no sentido de permitir que este controle se ajuste, da melhor forma possível às flutuações ocorridas no volume do tráfego das suas aproximações. Estas estratégias, denominadas genericamente de controle atuado pelo tráfego, incluem desde o princípio clássico da extensão dos tempos de verde, baseado no *headway* máximo admitido, até técnicas mais recentes com o uso da lógica *fuzzy* e/ou de redes neurais (Niittymäki, 1998; Bingham, 1998; Sayers *et al.*, 1998; Gadêlha *et al.*, 1999), passando pela técnica de controle de grupo semafórico, comumente utilizada nos países nórdicos. Desde os anos sessenta são empregadas, também, estratégias que usam otimizações matemáticas, associadas ou não a algoritmos heurísticos.

Várias pesquisas foram realizadas tendo como tema os controladores *fuzzy*. De forma geral, estes dispositivos apresentam os seguintes componentes: interface de fuzificação, base de conhecimento, unidade lógica de tomada de decisão e interface de defuzificação. A interface de fuzificação, de forma sucinta, envolve as seguintes funções: medir os valores das variáveis de entrada e realizar a função de fuzificação que converte os dados de entrada em valores lingüísticos apropriados, que podem ser vistos como rótulos de conjuntos *fuzzy*. A base de conhecimento compreende o domínio da aplicação e os objetivos do controle. Isto é, a base de dados que provê as definições necessárias para definir regras de controle lingüístico e manipulação de dados no controlador. A unidade lógica de tomada de decisão é o cerne de um controlador; ela tem a capacidade de simular a decisão humana baseada em concepções *fuzzy* e em regras de inferência na lógica *fuzzy*. A interface de defuzificação é responsável por propiciar uma ação de controle a partir de uma inferência *fuzzy*.

Em 1977, Pappis e Mamdani desenvolveram o primeiro modelo de controlador semafórico que aplica a lógica *fuzzy* para definir a extensão dos tempos de verde em interseções isoladas. A partir deste trabalho, diversos outros controladores semafóricos *fuzzy* foram desenvolvidos (Chiu, Czogalla, Favilla, Gadelha, Trabia e Niittymäki) e testados comparativamente a controladores de tempo fixo e/ou semi-atuados. Em geral, os testes realizados foram favoráveis aos controladores *fuzzy* (Niittymäki e Nevalla, 2001).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

A partir do trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani (1977), estudos presentes na literatura revelam que os componentes de alguns controladores semafóricos *fuzzy* para interseções isoladas são praticamente os mesmos propostos por estes pesquisadores

Além dos operadores, que já foram estudados por Jacques *et al.* (2002b), as formas das funções de pertinência utilizadas nestes controladores são sempre as mesmas, isto é, triangulares e trapezoidais. A teoria dos conjuntos *fuzzy* não impõe o uso destas funções (triangulares e trapezoidais) na definição das funções de pertinência.

Para implementação de um controlador *fuzzy* pode-se utilizar alguns softwares, como o MATLAB, que disponibiliza um ferramental *fuzzy*, com várias opções para a definição das funções de pertinência.

Assim, a não exploração de outras formas funcionais, no desenvolvimento de controladores semafóricos *fuzzy*, pode implicar em um sub-aproveitamento das diferentes possibilidades oferecidas pela lógica *fuzzy* na implementação dos principais componentes desses controladores semafóricos. Portanto, a questão que se coloca é a verificação da possibilidade de melhorar o desempenho do Controlador Semafórico *Fuzzy* através da definição de conjuntos *fuzzy* com funções de pertinência diferentes das usualmente adotadas (triangulares e trapezoidais).

1.3 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a influência do tipo das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho do Controlador Semafórico *Fuzzy*.

Como objetivos específicos tem-se:

- identificar e estudar os principais tipos de funções de pertinência que podem ser utilizados para caracterizar os conjuntos *fuzzy* empregados em controladores *fuzzy*;
- investigar o impacto da utilização de formas funcionais diferentes das comumente empregadas (triangular e trapezoidal) sobre a resposta do controlador semafórico *fuzzy* e sobre o desempenho do tráfego controlado;
- avaliar o resultado da associação entre as diferentes funções de pertinência estudadas e alguns dos principais métodos utilizados para a interface de defuzzificação.

1.4 JUSTIFICATIVA

Os estudos presentes na literatura sobre a utilização da lógica *fuzzy* para o controle de interseções isoladas indicam que a idéia básica desta utilização é modelar o controle baseado no conhecimento humano especializado, ao invés de modelar o processo em si. Isto é, os controladores *fuzzy* são projetados para capturar os fatores chaves para o controle do processo sem a exigência de formulações matemáticas sofisticadas. A lógica *fuzzy* tem a habilidade de entender instruções lingüísticas e de gerar estratégias de controle baseadas, a priori, em comunicação verbal. Por isso, sua utilização é potencialmente vantajosa em sistemas de controle do tráfego que precisam ser flexíveis para atingir objetivos ligados, simultaneamente, à circulação e às questões ambientais (Sayers *et al.*, 1998).

Diversos trabalhos têm buscado o desenvolvimento de controladores semafóricos *fuzzy*, após o trabalho pioneiro de Pappis e Mandani em 1977, para o controle de interseções isoladas. Um estudo realizado por Jacques *et al.* (2002b) analisou os aspectos teóricos da lógica *fuzzy* e constatou que os operadores definidos no trabalho de Pappis e Mandani (1977) têm sido continuamente utilizados em outros controladores sem que o impacto desta escolha tenha sido devidamente mensurado, ou seja, estes operadores são escolhidos sem que os pesquisadores tenham certeza se eles são realmente a escolha ideal para o melhor desempenho do controlador semafórico. O mesmo pode ser dito acerca da caracterização das funções de pertinência. Comumente, são utilizadas funções triangulares ou trapezoidais sem a devida averiguação dos impactos da seleção de outras funções sobre o desempenho do controlador semafórico. Este tipo de procedimento traz dois problemas básicos: deixa-se de explorar as potencialidades da lógica *fuzzy* para o trato com os controladores e, por último, não se tem uma avaliação sobre o desempenho dos controladores quando estes estão operando com outras funções de pertinência.

A função de pertinência de cada conjunto *fuzzy* é, portanto, um aspecto muito importante relacionado à operação do controlador. Contudo, a escolha da função, e conseqüentemente da sua forma, segue critérios subjetivos, sendo mais utilizadas as funções triangulares e trapezoidais. As funções de pertinência devem ser definidas a partir do conhecimento e experiência de especialistas. Entretanto, o que a literatura relacionada a controladores semafóricos *fuzzy* revela é que a participação dos especialistas tem ficado restrita à definição dos valores a serem assumidos pelas variáveis lingüísticas, somente em termos dos elementos limites e característicos (com pertinência igual a um) dos conjuntos *fuzzy* associados a esses valores. Isto é, a forma das funções de pertinência é definida a “*priori*” como triangular e trapezoidal. Portanto, este estudo visa abordar os impactos sofridos pelos controladores ao substituir as funções de pertinência triangulares e trapezoidais por outros tipos de funções de pertinência.

1.5 HIPÓTESE

O tipo de função de pertinência utilizada afeta significativamente a resposta do Controlador Semafórico *Fuzzy* e, portanto, o desempenho do tráfego por ele controlado.

1.6 ORGANIZAÇÃO DO ESTUDO

Para a consecução dos objetivos propostos e verificação da hipótese apontada, o presente trabalho foi estruturado em seis capítulos. O primeiro capítulo contém a apresentação do tema, a caracterização do problema, os objetivos do estudo e a hipótese.

O segundo capítulo faz uma caracterização do desenvolvimento da lógica; abordando a lógica clássica, a lógica simbólica e a lógica *fuzzy*.

No terceiro capítulo é realizada uma revisão abordando os controladores *fuzzy* e os controladores semafóricos *fuzzy*. Neste capítulo é definido o controlador utilizado para o estudo do impacto das formas de função de pertinência.

Em seguida, o quarto capítulo trata dos conjuntos *fuzzy*, da definição das funções de pertinência e suas características, além de apresentar razões que justificam a utilização da função triangular em processos de modelagem *fuzzy*.

O quinto capítulo apresenta um estudo do impacto das diferentes formas de função de pertinência sobre a resposta do controlador e sobre o desempenho do tráfego controlado. Neste capítulo também é apresentado um estudo exploratório acerca dos métodos de defuzzificação em controladores com funções de pertinência triangular e trapezoidal e em controladores com outras formas de funções de pertinência.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho, incluindo a análise relacionada à verificação da hipótese proposta e recomendações para estudos futuros.

2 LÓGICA FUZZY

Este capítulo visa realizar uma breve caracterização do desenvolvimento da lógica. Tem como ponto de partida a lógica clássica passando pela lógica simbólica para, assim, finalizar com a lógica *fuzzy*. De posse dessa caracterização histórica, a lógica *fuzzy* será tratada sob os seguintes aspectos: variáveis lingüísticas, conjuntos *fuzzy*, notação e operações destes conjuntos, relações *fuzzy*, composição e por último a inferência *fuzzy*.

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Durante vários séculos os primeiros filósofos se questionavam acerca de sua existência e da essência do mundo. As religiões, as tradições e os mitos se encarregaram de explicar estas indagações. Mas, com o passar do tempo estas explicações, cheias de fantasias e sentimentos religiosos, já não satisfaziam as pessoas que procuravam explicações racionais (Chauí, 2000).

A sociedade grega foi o local ideal para que essas idéias questionadoras prosperassem, pois com o desenvolvimento das cidades gregas Atenas torna-se o núcleo da vida sócio-cultural da Grécia. Neste período há o fortalecimento da democracia e da igualdade dos homens perante às leis. Segundo Rodrigues (2005), a participação popular, no governo da cidade, se dava através da discussão e do debate de idéias. Assim, para que o cidadão conseguisse ter suas idéias aceitas nas assembléias era preciso que ele soubessem persuadir. Com isso, o sistema educativo adotado pela aristocracia vai sendo substituído por outro. Os novos parâmetros para a educação dos jovens gregos, estabelecem como padrão ideal, a formação do bom orador, isto é, aquele que sabia falar em público e persuadir os outros na política.

Com o ideal de se formar um cidadão eloquente surge na Grécia a figura dos **sofistas** que são os primeiros filósofos do período socrático. Os sofistas ministravam técnicas de persuasão para os jovens, que aprendiam a defender ou a atacar uma determinada opinião. Deste modo, em uma assembléia, o cidadão teria fortes argumentos para ganhar uma discussão. Esta formação dos cidadãos gregos levou o filósofo Sócrates a rebelar-se contra a prática dos sofistas pois ele acreditava que os jovens estariam valorizando o erro e a mentira tanto quanto a verdade (Chauí, 2000). Os trabalhos de Sócrates abriram caminho para Platão e Aristóteles, que viriam a se tornar importantes precursores do pensamento ocidental.

2.1.1 LÓGICA CLÁSSICA

A lógica clássica é uma síntese dos principais resultados da investigação dos filósofos, ao longo dos séculos, acerca das regras do pensamento válido. Pode ser denominada como estudo das regras fundamentais da linguagem e do pensamento humano. Seu nome deriva de *logos*, palavra grega que significa proposição, discurso, pensamento e linguagem.

Na lógica clássica parte-se muitas vezes do princípio que os elementos fundamentais do conhecimento são os conceitos (idéias ou noções comuns), como entidades mentais correspondentes às coisas ou substâncias, e suas qualidades: "casa", "branco", "alto", etc. Os conceitos podem ser relacionados entre si, dando origem aos juízos: "a casa é branca", "o morador daquela casa é alto", etc., que podem ser verdadeiros ou falsos. Finalmente, pode-se, também, estabelecer relações entre juízos, que serão as inferências: "se João mora naquela casa é um homem afortunado; ora João não é um homem afortunado, logo não mora naquela casa", passíveis de serem válidas ou não. O tipo de inferência mais estudado na lógica é o silogismo, que é a forma de raciocínio em que a partir de duas proposições iniciais se infere uma conclusão (Abar, 2004).

A partir do século XIX, a lógica passa a fundamentar-se intrinsecamente em pressupostos matemáticos, o que representa uma ruptura com relação à lógica precedente. Deste modo, criou-se a distinção entre lógica clássica, praticada até o século XIX, e a lógica matemática que se constituiu um redirecionamento radical nesta "disciplina" (Abar, 2004).

2.1.2 LÓGICA SIMBÓLICA

A Lógica Moderna começou no século XVII com o filósofo e matemático alemão Wilhelm Leibniz. Suas pesquisas influenciaram vários estudos no ramo da lógica matemática moderna e outras áreas relacionadas. Entre outras coisas, Leibniz queria dotar a metafísica (parte da filosofia que estuda o "ser" em si) de um instrumento poderoso que permitisse alcançar o mesmo grau de rigor que tinha alcançado a matemática. Leibniz tinha a convicção de que as discussões filosóficas não resolvidas tinham como causa a ambigüidade dos termos e processos conclusivos da linguagem. O filósofo almejava a realização de um projeto com uma lógica simbólica de caráter completamente "calculístico", análogo aos procedimentos matemáticos (UFSC, 2005). Assim, a matemática rompeu a tradição multissecular que a havia encerrado no âmbito da

geometria. Estava sendo construído um simbolismo cada vez mais manipulável e seguro, capaz de funcionar de uma maneira mecânica e automática, sujeito a operações que, no fundo, não eram mais do que regras para manipulação de símbolos, sem a necessidade de fazer uma contínua referência a conteúdos geométricos intuitivos (Costa, 1992).

Leibniz ambicionava a criação de uma linguagem universal baseada em um alfabeto do pensamento ou *characteristica universalis*, uma espécie de cálculo universal para o raciocínio. Em sua visão esta linguagem deveria ser como a álgebra ou como uma versão dos ideogramas chineses: uma coleção de sinais básicos que padronizassem noções simples não analíticas. Noções mais complexas teriam seu significado através de construções apropriadas envolvendo sinais básicos, que iriam assim refletir a estrutura das noções complexas, em última instância, a realidade. O uso de numerais para representar noções não analíticas poderia tornar possível o cálculo das verdades de qualquer ciência, por operações aritméticas, desde que referidas na linguagem universal. Conforme o próprio Leibniz, “(...) quando aparecer uma controvérsia, já não haverá necessidade de uma disputa entre dois filósofos mais do que há entre dois calculistas. Bastará, com efeito, tomar a pena na mão, sentar-se à mesa e (ao convite de um amigo, se desejar), dizer um ao outro: Calculemos!”(Rodrigues, 2005).

Ao querer dar à lógica uma linguagem livre de ambigüidades e ao procurar associar a cada idéia um sinal e obter a solução de todos os problemas mediante a combinação destes sinais, Leibniz acabou provocando um novo desenvolvimento da própria lógica. A contribuição de Leibniz ao desenvolvimento da lógica aparece sob dois aspectos: aplicação de métodos matemáticos para a interpretação dos silogismos aristotélicos; e a indicação de partes da álgebra que estão abertas a uma interpretação não aritmética. Assim Leibniz tornou-se o grande precursor da lógica matemática (UFSC, 2005).

No início do século XIX, a matemática havia se desenvolvido muito. Todavia, pouca era a preocupação com os fundamentos do edifício assim construído, pois a maioria dos pesquisadores se interessava em desenvolver sua ciência tendo em vista principalmente as aplicações. Sob o impulso de Cauchy, Abel, Weierstrass, entre outros, iniciou-se um movimento de retorno aos fundamentos, para classificar certos pontos dúbios e assentar as diversas disciplinas matemáticas sobre bases sólidas (Costa, 1992). Em conjunto com a reestruturação realizada nos fundamentos da matemática, também se processou um grande

progresso na lógica formal. Em meados do século XIX, especialmente com Boole, a lógica realizou avanço extraordinário. Boole dotou a lógica de um simbolismo matemático que permitiu análise profunda das operações lógicas e lançou, por isso mesmo, as bases de desenvolvimento ainda maiores.

Durante um período que quase superou dois mil anos, a lógica formal (aristotélica) conhecida pela sua formulação silogística, foi universalmente considerada como completa e incapaz de sofrer uma melhora essencial. Mais do que isso, a lógica formal parecia ficar limitada à metafísica, já que a grosso modo, se tratava apenas de uma manipulação de palavras. Não havia ainda dado um salto para um simbolismo efetivo, embora Leibniz já tivesse aberto o caminho com suas idéias sobre o “alfabeto do pensamento” (Chauí, 2000).

Boole em sua obra *The Mathematical Analysis of Logic* (1847) forneceu uma idéia clara de formalismo e desenvolveu a lógica de modo exemplar (*apud* UFSC, 2005). Ele percebeu que poderia ser construída uma álgebra de objetos que não fossem números. Tal álgebra, sob a forma de um cálculo abstrato, seria capaz de ter várias interpretações. O que chamou a atenção em sua obra foi o formalismo, algo que seria a essência do cálculo. Boole criou o primeiro sistema bem sucedido para o raciocínio lógico, tendo sido pioneiro ao enfatizar a possibilidade de se aplicar o cálculo formal em diferentes situações e fazer cálculos de acordo com regras formais, desconsiderando as interpretações dos símbolos usados.

Com seu trabalho, Boole estava convencido de que não só demonstrou a equivalência entre a matemática e a lógica, mas que também representou a sistematização do pensamento humano. A partir de Boole a ciência viu que a razão humana é mais complicada, ambígua e mais poderosa que a lógica formal. Contudo, a lógica simbólica booleana, do ponto de vista matemático, foi importante, pois a lógica de até então era incompleta e não explicava muitos princípios de dedução empregados em raciocínios matemáticos elementares (Costa, 1992).

2.2 ELEMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Há situações, como intensidade da temperatura, tonalidades de vermelho etc., que não se apresentam como estritamente dicotômicas, ou seja, com dois estados excludentes bem definidos.

A dificuldade, ou a impossibilidade, de se obter todas as informações e de equacionar a realidade imprecisa do mundo, levou alguns cientistas a propor lógicas alternativas que seriam mais propícias à representação daquele mundo particular. Uma destas proposições é a lógica “*fuzzy*” de Zadeh, que foi apresentada em 1965, através da publicação do artigo “*Fuzzy Sets*” (Zadeh, 1965). Assim a lógica *fuzzy* se apresenta como uma alternativa para a manipulação de dados imprecisos.

Grande parte da problemática do conhecimento está em representar matematicamente idéias sobre pensamento, sensações ou percepções do mundo físico que nos rodeia, sem perder a precisão. Olhando unicamente pelo lado técnico, a linguagem habitual oferece múltiplos inconvenientes. Ela não é manuseável com as linguagens elaboradas pela matemática, além de ser quase totalmente inapta para fazer aparecer comodamente a isomorfia de expressões diferentes, o que, contudo, é indispensável a uma ciência formal.

A lógica *fuzzy* é uma teoria que permite expressar de forma matemática as enunciações do pensamento, ou seja, as manifestações da linguagem natural, sem diminuir a potência expressiva das mesmas. Através da lógica *fuzzy* pode-se realizar operações com palavras, onde aos conjuntos *fuzzy* compete expressar os valores das mesmas. Desta forma, a precisão ou imprecisão, dependendo do que o pesquisador anseia, será expressa através de um número, que indicará a possibilidade, e não a probabilidade, de tal afirmação estar correta.

2.2.1 Variáveis Lingüísticas

A investigação científica tem como característica procurar padrões ou semelhanças entre fenômenos observados. Assim, a habilidade para resumir informações é de suma importância para caracterizar fenômenos complexos.

Em uma linguagem natural L , cada termo pode ser visto como uma descrição resumida de um conjunto *fuzzy* $M(x)$ de um universo de discurso U , com $M(x)$ representando o significado de “ x ”. Neste sentido, a linguagem como um todo pode ser vista como um sistema que determina palavras, frases e sentenças para conjuntos *fuzzy* do universo de discurso U . Por exemplo, se o significado do nome “flor” é um conjunto *fuzzy* $M(\text{flor})$ e o significado do adjetivo “vermelho” é um conjunto *fuzzy* $M(\text{vermelho})$, então, o significado do nome “flor vermelha” é dado pela interseção de $M(\text{vermelho})$ e $M(\text{flor})$. Se for considerada a cor de um objeto como a variável, então estes valores: vermelho, azul, amarelo, verde, etc., podem ser interpretados como rótulos de conjuntos *fuzzy* de um universo de discurso de objetos. Neste sentido, o atributo cor é uma variável *fuzzy* cujos valores são rótulos de conjuntos *fuzzy*. Isto é importante para realçar que a caracterização de uma variável como cor através da variável lingüística é mais precisa do que o valor numérico em particular.

A função da variável lingüística é providenciar um meio sistemático para caracterização aproximada de um fenômeno complexo. Em essência, afastando-se do uso de variáveis quantificadas e assim empregando o tipo de descrição lingüística utilizada pelas pessoas em geral, adquire-se uma capacidade de tratar com sistemas que são mais complexos e menos suscetíveis de serem analisados de forma convencional por termos matemáticos (Zadeh, 1973).

2.2.2 Conjuntos Fuzzy

Um conjunto *fuzzy* “ A ” é uma classe de objetos com um grau contínuo de pertinência. Esse conjunto é caracterizado por uma função de pertinência que atribui para cada objeto um grau de associação que varia de $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$, ou seja, cada elemento “ x ” do conjunto *fuzzy* é caracterizado por $[x, \mu_A(x)]$. A noção de inclusão, união, interseção, complemento, relação, convexidade, etc. são estendidas, assim, como as várias propriedades dos conjuntos ordinários, para o contexto *fuzzy*.

A teoria tradicional dos conjuntos define a pertinência de proposições como: Pedro é muito alto, Joana está ligeiramente mais gorda, Lígia é baixa, Carla está com febre alta, e Maria tem em torno de 35 anos, como um predicado booleano (sim ou não). Por outro lado, a teoria “*fuzzy*” permite representar a pertinência de um conjunto como uma distribuição de

possibilidades como mostrada na Figura 2.1, lado esquerdo, onde aparece o conjunto de pessoas altas e o conjunto de pessoas muito altas. Já na mesma figura, lado direito, mostra-se a definição booleana, padrão de pessoas altas. Nesta última, uma pessoa é alta ou não, e deve haver uma altura específica que defina o limite. O mesmo se aplica para o caso de pessoas muito altas. No gráfico da esquerda, Figura 2.1, a inclusão de alguém em um conjunto (muito alto ou alto) irá depender de sua altura, sendo que, para definir o conjunto ao qual a pessoa pertence, é necessário conhecer o valor da função de pertinência, que terá o limite superior igual a 1.

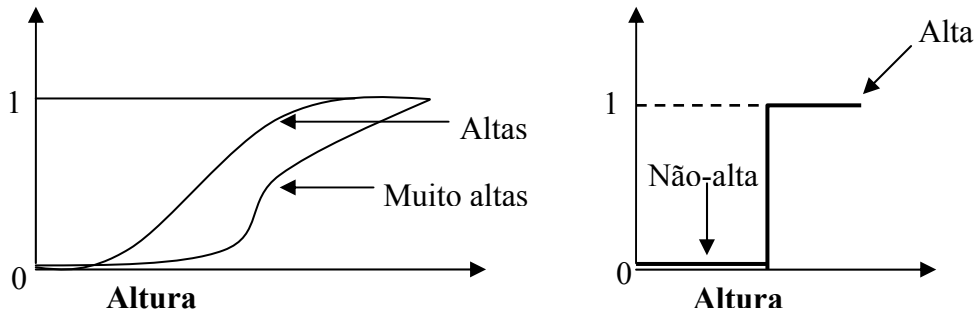


Figura 2.1 Pertinência “fuzzy” versus Pertinência abrupta (Azevedo *et al.*, 2000).

2.2.2.1 Notação e Operações dos Conjuntos Fuzzy

A expressão “suporte de um conjunto fuzzy A ”, ou a indicação $sup(A)$ diz respeito ao conjunto de pontos do conjunto “ U ” pertencentes ao conjunto “ A ” e que apresenta $\mu_A(x) \geq 0$. Um ponto de cruzamento em “ A ” é definido como um elemento de “ U ” cujo grau de pertinência em “ A ” é 0,5. Um conjunto *fuzzy singleton* é um conjunto fuzzy cujo suporte é formado por um único elemento cuja pertinência é igual a 1. A notação de um conjunto *singleton* é dada por:

$A = \mu/x$, onde μ é o grau de pertinência de “ x ” em “ A ”. Daí tem-se:

$A = 1/x$ quando “ A ” é um conjunto fuzzy *singleton*.

De forma geral, um conjunto fuzzy pode ser denotado por:

$$A = \int_U \mu_A(x)/x \quad (2.1)$$

onde o sinal da integral representa tão somente a união de $\mu_A(x)/x$. Se “ A ” tiver um suporte finito $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, pode-se representar este conjunto como sendo

$$A = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \dots + \mu_n/x_n, \text{ ou } A = \sum_{i=1}^n \mu_i/x_i, \quad (2.2)$$

em que μ_i é o grau de pertinência de x_i em A com ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) (Zadeh, 1973).

2.2.2.2 Operações em Conjuntos Fuzzy

Sejam “A” e “B” dois conjunto *fuzzy* no conjunto universo de discurso U, com funções de pertinência μ_A e μ_B , respectivamente. As operações de união, interseção e complemento para conjuntos *fuzzy* são definidas via suas funções de pertinência (Lee, 1990), como mostrado nas Equações 2.3, 2.4, 2.5 e 2.6.

- União de dois conjuntos *fuzzy*, correspondente ao conectivo “ou”

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.3)$$

Este conectivo pode ser implementado pelo operador união (máximo). Contudo, de forma mais ampla pode-se aplicá-lo através de uma família de operadores denominados por T-conormas ou S-normas. As S-normas mais utilizadas estão listadas abaixo:

União $\rightarrow \text{Max}(x, y)$

Soma algébrica $\rightarrow x + y - x * y$

$$\text{Soma limitada} \rightarrow \begin{cases} x \rightarrow y = 0 \\ y \rightarrow x = 0 \\ 0 \rightarrow x, y > 0 \end{cases}$$

- Interseção de dois conjuntos *fuzzy*, correspondente ao conectivo “e”

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.4)$$

O conectivo “e” é implementado pelo operador interseção (mínimo). Ele, da mesma forma que os integrantes da S-norma, pode ser implementado por uma família de operadores,

contudo, esta família recebe o nome de T-normas. A seguir, uma relação das T-normas mais utilizadas:

Interseção $\rightarrow \min(x, y)$

Produto algébrico $\rightarrow x * y$

Produto limitado $\rightarrow \max(0, x+y-1)$

Produto drástico $\rightarrow \begin{cases} x \rightarrow y = 0 \\ y \rightarrow x = 0 \\ 0 \rightarrow x, y > 0 \end{cases}$

- Complemento de um conjunto *fuzzy*:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.5)$$

A operação de complemento corresponde à negação. Assim se “A” é um “nome” para um conjunto *fuzzy*, o “não A” deve ser interpretado como “ $\neg A$ ”.

Para definir a operação complemento de um conjunto *fuzzy* “A”, por exemplo, onde o símbolo $\neg A$ denota esse complemento, aplica-se a Equação (2.6).

$$\neg A = \int_U (1 - \mu_A(x)) / x \quad (2.6)$$

Zadeh (1973) propôs um conjunto de operações que são utilizadas para a representação da intensidade lingüística. São elas: operação de concentração, operação de dilatação e a operação intensificação do contraste (ver Equações 2.7, 2.8, 2.9).

A operação de concentração é aplicada em um conjunto *fuzzy* com o objetivo de reduzir a magnitude do grau de pertinência do elemento “x” no conjunto *fuzzy*. Esta pertinência terá uma relativa diminuição se o seu valor for grande; em contrapartida terá uma diminuição grande, se o seu valor da pertinência for pequeno. Esta operação é definida como:

$$\text{COM}(A) = A^2, \text{ onde “A” é um conjunto fuzzy.} \quad (2.7)$$

A operação de dilatação tem o efeito contrário da concentração. Assim, ela é definida como:

$$\text{DIL}(A) = A^{0,5}, \text{ onde "A" é um conjunto fuzzy.} \quad (2.8)$$

A operação de intensificação de contraste difere da concentração na medida que aumenta os valores de pertinência que estão acima de 0,5 e diminui os valores que estão abaixo deste ponto. Assim, a intensificação do contraste tem o efeito de reduzir a característica *fuzzy* do conjunto. Esta operação é definida por:

$$\text{INT}(A) = \begin{cases} 2A^2, & \text{para } 0 \leq \mu_A(x) \leq 0,5 \\ -2(-A^2), & \text{para } 0,5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.9)$$

A título de ilustração das operações anteriormente apresentadas, considere-se o conjunto A, apresentado na Equação (2.10) definido no suporte finito $\text{sup}(A) = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, pertinente ao universo de discurso U.

$$A = \sum_{i=1}^9 \mu_i / x_i = 0,0/0 + 0,25/1 + 0,5/2 + 0,75/3 + 1,0/4 + 0,75/5 + 0,5/6 + 0,25/7 + 0,0/8 \quad (2.10)$$

O conjunto definido pela concentração de A é obtido pelas Equações 2.11 e 2.12

$$\text{COM}(A) = A^2 = \sum_{i=1}^9 \mu_i^2 / x_i \quad (2.11)$$

$$A^2 = 0,0/0 + 0,0625/1 + 0,25/2 + 0,5625/3 + 1,0/4 + 0,5625/5 + 0,25/6 + 0,0625/7 + 0,0/8 \quad (2.12)$$

A aplicação da operação de dilatação, por sua vez, pode ser verificada nas Equações 2.13 e 2.14.

$$\text{DIL (A)} = A^{0,5} = \sum_{i=1}^9 \mu_i^{0,5} / x_i \quad (2.13)$$

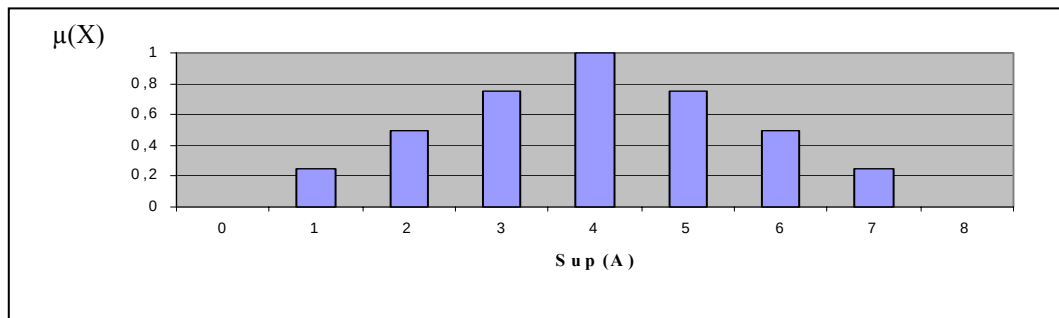
$$A^{0,5} = 0,0/0 + 0,5/1 + 0,707/2 + 0,866/3 + 1,0/4 + 0,866/5 + 0,707/6 + 0,5/7 + 0,0/8 \quad (2.14)$$

Já o resultado de intensificação é apresentado através das Equações 2.15 e 2.16.

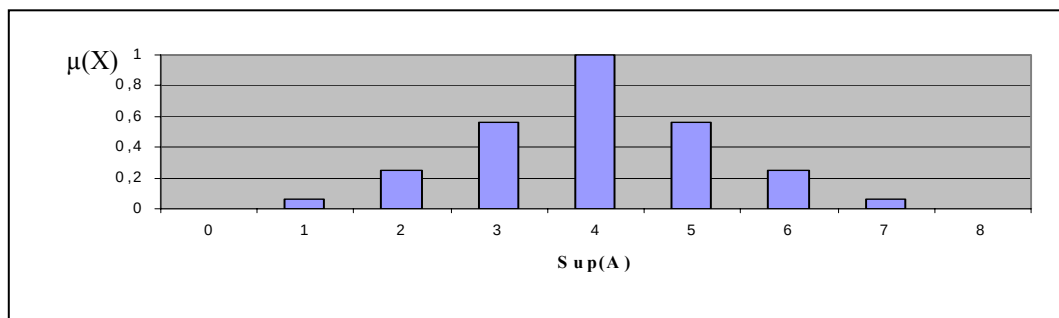
$$\text{INT(A)} = \begin{cases} 2A^2 = \sum_{i=1}^9 2\mu_i^2 / x_i & \text{para } 0,5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \\ -2(\neg A^2) = \sum_{i=1}^9 [1 - 2(1 - \mu_i)^2] / x_i & \text{para } 0,5 \leq \mu_A(x) \leq 1 \end{cases} \quad (2.15)$$

$$\text{INT(A)} = 0,0/0 + 0,125/1 + 0,5/2 + 0,875/3 + 1,0/4 + 0,875/5 + 0,5/6 + 0,125/7 + 0,0/8 \quad (2.16)$$

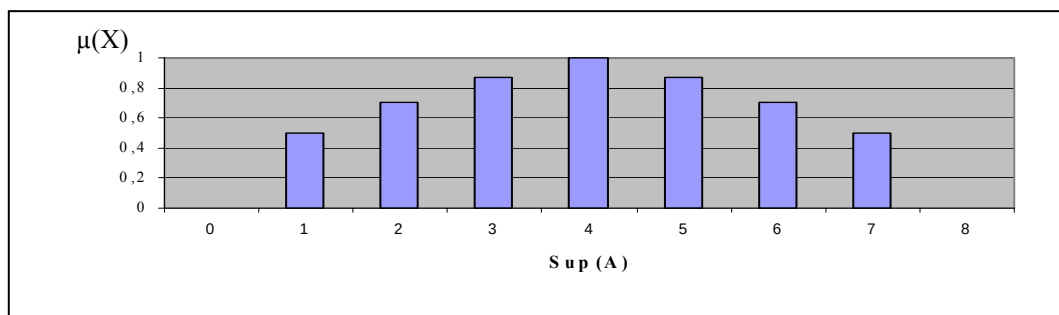
O conjunto *fuzzy* A e os conjuntos resultantes das operações de concentração, dilatação e intensificação podem ser observados na Figura 2.2



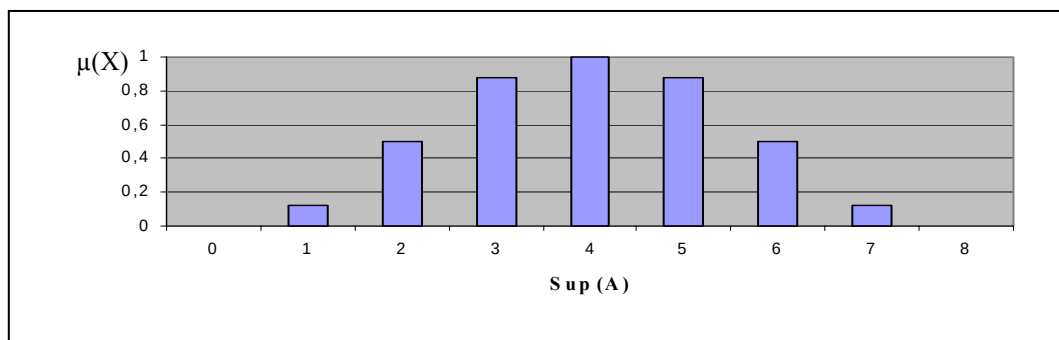
(a) Conjunto A



(b) COM(A)



(c) DIL(A)



(d) INT(A)

Figura 2.2 Conjunto A original e modificado

2.2.2.3 Relações *Fuzzy*

Uma relação entre conjuntos clássicos (*crisp*) representa a presença ou ausência da associação, interação ou conexão entre os elementos de dois ou mais conjuntos. Esta concepção pode ser generalizada para permitir vários graus de intensidade das relações ou interação entre elementos. Graus de associação podem ser representados por graus de pertinência em uma relação *fuzzy*, do mesmo modo que a pertinência de um elemento é representada em um conjunto *fuzzy*.

Antes de citar a definição de relação *fuzzy* se faz mister apresentar o conceito de *tuple* (Klir, 1988). Elementos de um produto cartesiano de n conjuntos *crisp* são n -tuples $(x_1, x_2, \dots, x_n)$, de tal modo que $x_i \in X_i$ para todo $i \in N$. Assim,

$$X_i = \{(x_1, x_2, \dots, x_n) / x_i \in X_i \text{ para todo } i \in N\}.$$

Uma relação *fuzzy* é um conjunto *fuzzy* definido no produto cartesiano de conjuntos clássicos $X_1, X_2, \dots, X_n$, onde *tuples* $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ podem ter graus variáveis de pertinência com a relação. O grau de pertinência indica a força da relação entre os elementos do *tuple*.

Qualquer relação entre dois conjuntos X e Y é conhecida como relação binária. Sua representação pode ser feita na forma $[xRy]$, quando $(x,y) \in R(x,y)$ em uma relação *crisp*, ou $[\alpha / xRy]$ quando $\mu_R(x,y) = \alpha$ em uma relação *fuzzy*.

Uma outra forma de representação das relações *fuzzy*, além da matriz de pertinência, é o diagrama sagital (que tem a forma de seta). Neste diagrama os conjuntos X e Y são representados por conjuntos de nós que indicam os elementos de cada conjunto. Os elementos de X e Y , com pertinência diferente de zero são representados no diagrama por linhas conectando os respectivos nós. Estas linhas são rotuladas como o valor do grau de pertinência $\mu_R(x,y)$. A Figura 2.3 ilustra o diagrama sagital da relação entre $X = \{1, 2, 3, 4\}$ e $Y = \{5, 6, 7, 8\}$.

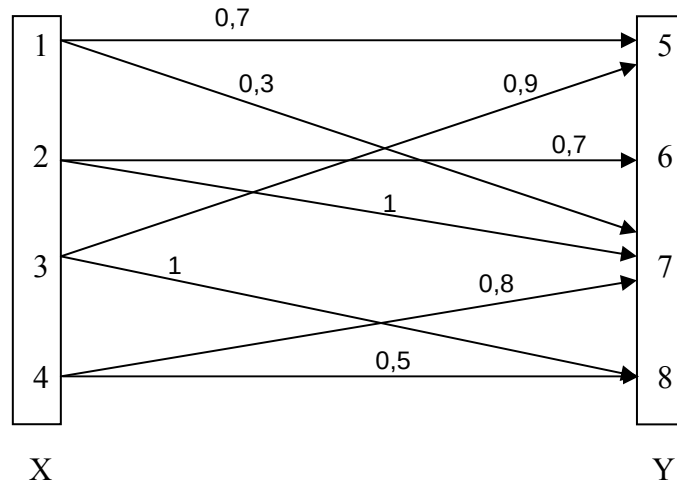


Figura 2.3: Diagrama Sagital

O domínio de uma relação *crisp* é definido como: $\text{dom } R(X,Y) = \{x / x \in X, (x,y) \in R \text{ para algum } y \in Y\}$. Se a relação $R(X,Y)$ é *fuzzy*, o domínio é o conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência é definida por: $\mu_{\text{dom}R}(x) = \max_{y \in Y} \mu_{R(X,Y)}(x,y)$ para cada $x \in X$. Portanto, cada elemento do conjunto X pertence ao domínio de R com a força de sua relação mais forte com qualquer elemento de Y . Em relações *fuzzy*, o domínio refere-se ao conjunto suporte do domínio ($\mu \neq 0$).

A imagem (*range*) de uma relação *crisp* binária é denotada por $\text{ran } R(X,Y) = \{y / y \in Y, (x,y) \in R \text{ para algum } x \in X\}$. Quando se trata de uma relação *fuzzy*, a imagem é o conjunto *fuzzy* $\text{ran } R(X,Y)$ cuja função de pertinência é definida por $\mu_{\text{ran}R}(y) = \max_{x \in X} \mu_{R(X,Y)}(x,y)$ para cada $y \in Y$.

Portanto cada elemento do conjunto Y pertence à imagem de R com a força de sua relação mais forte com qualquer elemento de X . Em relações *fuzzy*, a imagem refere-se ao conjunto suporte da imagem ($\mu \neq 0$).

O inverso de uma relação *crisp* $R(X,Y)$ é denotado por $R^{-1}(X,Y)$ e é um subconjunto de $Y \times X$, de modo que

$$R^{-1}(X,Y) = \{(x,y) / (x,y) \in R\}, \text{ onde } x \in X \text{ e } y \in Y.$$

O domínio da relação $R(X,Y)$ é igual à imagem de $R^{-1}(X,Y)$ e o domínio $R^{-1}(X,Y)$ é igual a imagem de $R(X,Y)$. Para uma relação *fuzzy* $R(X,Y)$, o inverso da relação *fuzzy* $R^{-1}(X,Y)$ é definido por: $\mu_{R^{-1}}(y,x) = \mu_R(x,y)$, para todo $(x,y) \in X \times Y$

A matriz pertinência M_R^{-1} representando $R^{-1}(X,Y)$ é a transposta da matriz M_R para $R(X,Y)$, ou seja $(R^{-1})^{-1} = R$, para alguma relação binária *fuzzy* (Klir,1988).

2.2.2.4 Composição

Considere duas relações crisp binárias $P(X,Y)$ e $Q(Y,Z)$ definidas com um conjunto em comum Y . A composição, escrita sob a forma $R(X,Z) = P(X,Y) \circ Q(Y,Z)$, é definida como subconjunto $R(X,Z)$ de $(X \times Z)$ tal que $(x,z) \in R \Leftrightarrow \exists$ ao menos um $y \in Y$ tal que $(x,y) \in P$ e $(y,z) \in Q$. As três propriedades a seguir devem ser satisfeitas para P , Q e R :

$$P \circ Q \neq Q \circ P$$

$$(P \circ Q)^{-1} = Q^{-1} \circ P^{-1}$$

$$(P \circ Q) \circ R = P \circ (Q \circ R)$$

Exatamente como as operações união e interseção têm uma variedade de generalizações, a operação de composição para relações *fuzzy* pode assumir várias formas. A mais comum dessas é a max-mim, que é denotada por $P(X,Y) \circ Q(Y,Z)$, sendo definida por:

$$\mu_{P \circ Q}(x,z) = \max_{y \in Y} \min[\mu_P(x,y), \mu_Q(y,z)], \text{ para todo } x \in X \text{ e } z \in Z. \text{ Esta}$$

operação satisfaz as três propriedades listadas para relações *crisp*, anteriormente citadas. Outra forma de composição é a max-produto, que é escrita como $R(X,Z) = P(X,Y) \cdot Q(Y,Z)$ e definida por:

$$\mu_{R(X,Z)} = \max_{y \in Y} [\mu_P(x,y) \cdot \mu_Q(y,z)] \quad \forall x \in X \text{ e } z \in Z$$

Esta operação também satisfaz às três propriedades citadas anteriormente (Klir,1988).

A título de exemplo, considere-se as duas relações binárias $P(X,Y)$ e $Q(Y,Z)$ especificadas pela Figura 2.4

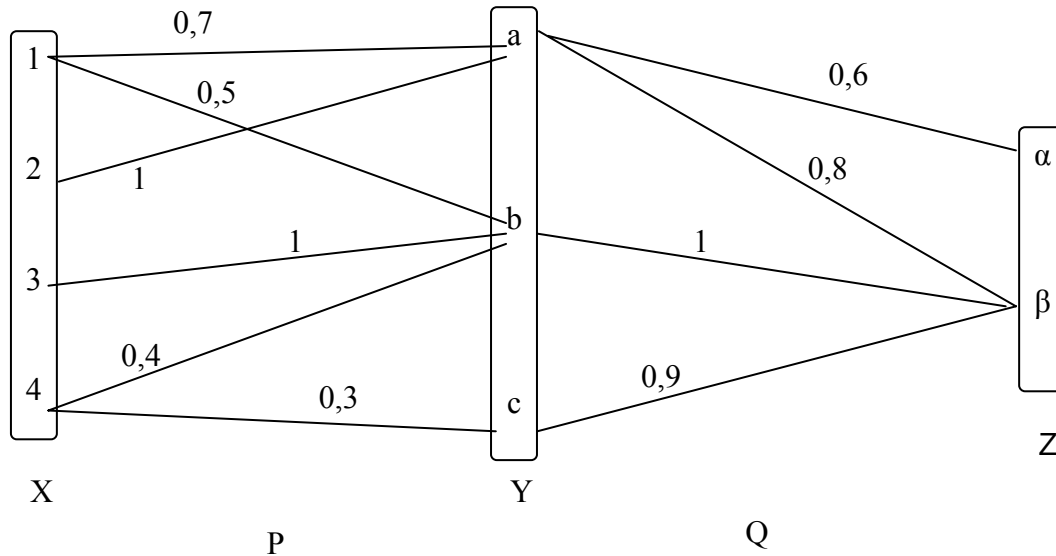


Figura 2.4: Representação das relações binárias “P” e “Q”

Sendo $R(X,Z) = P(X,Y) \circ Q(Y,Z)$, temos que R é representado pela função de pertinência; e os valores $\mu_R(X,Z)$ são os apresentados na Tabela 2.1

Tabela 2.1: Composição das relações *fuzzy* P e Q

R = P ◦ Q		
x	z	$\mu_{R(X,Z)}$
1	α	0,6
1	β	0,7
2	α	0,6
2	β	0,8
3	β	1
4	β	0,4

R é representada pela composição max-min, por exemplo:

$$\mu_R(4, \beta) = \max[\min(0,4;1), \min(0,3; 0,9)] = \max [0,4; 0,3] = 0,4$$

$$\mu_R(3, \alpha) = \max[\min(1,0), \min(0,0)] = \max [0,0] = 0$$

Isso quer dizer que todos os pares cuja relação tem grau de pertinência diferente de zero têm um elemento comum em Y .

2.2.3 Inferência *Fuzzy*

Em cálculos clássicos de proposições, expressões como: Se “A” então “B”, onde “A” e “B” são proposições, podem ser escritas da seguinte forma: “A” $\rightarrow$ “B”, de modo que a implicação ($\rightarrow$) é considerada como um conectivo definido por uma tabela verdade (ver Tabela 2.2)

Tabela 2.2: Tabela verdade das proposições “A” e “B”

A	B	A $\rightarrow$ B
V	V	V
V	F	F
F	V	V
F	F	V

Onde,

$$A \rightarrow B \equiv \neg A \vee B$$

Neste sentido as expressões $A \rightarrow B$ (“A” implica “B”) e $\neg A \vee B$ (não “A” ou “B”) têm tabelas verdades idênticas.

Para a realização de uma inferência *fuzzy* é de suma importância à concepção de um Enunciado Condicional *fuzzy*. Se “A” então “B” ou de forma simbólica $A \rightarrow B$, em que “A” é o antecedente e “B” o conseqüente, e em que “A” e “B” são antes de tudo conjuntos *fuzzy*.

Na lógica *fuzzy* há duas importantes regras de implicação *fuzzy*, nomeadas genericamente por *Modus Ponens* e *Modus Tolens*. A primeira está fortemente relacionada com a inferência da conseqüência ou seja, sabendo de alguns dados infere-se acerca de algo adiante. Em contrapartida, a segunda está fortemente relacionada com a inferência da premissa, ou seja, sabendo do resultado do conseqüente infere-se sobre a premissa. A Tabela 2.3 ilustra essas duas regras de implicação *fuzzy*.

Tabela 2.3: Ilustração das regras de implicação *fuzzy*

Premissas	<i>Modus Ponens</i>	<i>Modus Tolens</i>
Premissa 1	X é A'	Y é B'
Premissa 2	se X é A então Y é B	se X é A então Y é B
Conseqüência	Y é B'	X é A'

A função de implicação pode ser implementada por meio de diferentes regras de operação, tais como:

- a) Regra de Mandani (R_c)

$$R_c = \int_{U \times V} \mu_A(u) \wedge \mu_B(v) / (u, v)$$

- b) Regra de Larsen (R_c)

$$R_p = \int_{U \times V} \mu_A(u) \mu_B(v) / (u, v)$$

- c) Regra de Zadeh (R_m)

$$R_m = \int_{U \times V} [\mu_A(u) \wedge \mu_B(v)] \wedge [1 - \mu_A(u)]$$

O comportamento do controlador *fuzzy*, apresentado na próxima seção, dependerá de como as diferentes regras *fuzzy* serão agregadas. Esta associação será feita pelo conector “também”, que pode ser implementada por diferentes operadores e produzir uma relação combinada *fuzzy* (Santos, 2003). Esses operadores são os pertencentes à família das S-normas (ver Seção 2.4.2.2)

2.3 CONTROLADORES FUZZY

Segundo Favilla (1993), na teoria moderna das aplicações dos controladores, o primeiro passo para projetar um controlador é ter um modelo matemático que descreva o processo de controle. Todavia, isto requer um entendimento de todas as variáveis do processo, que nem sempre é fácil de obter se a ação a ser modelada, e conseqüentemente controlada, é complexa. A teoria de controle existente pode ser manipulada para uma variedade de

problemas em áreas onde os sistemas são bem definidos. Entretanto, todas estas técnicas têm sido incapazes de lidar com todo o potencial do conhecimento humano. Por exemplo, em muitas situações uma considerável quantidade de informações é disponível somente em forma qualitativa e seus critérios de desempenho são especificados somente em termos lingüísticos. Estas características introduzem um grau de incerteza ou imprecisão que dificulta o uso da maioria das abordagens matemáticas e probabilísticas correntes.

A modelagem de controle que utiliza a lógica *fuzzy* permite manipular informações qualitativas pautando-se por um rigor matemático. A lógica *fuzzy* faz suposições sobre o caminho em que a incerteza é descrita. Agindo assim, o processo torna-se bastante poderoso. Esta implementação em tempo real no processo de controle computacional ou micro-controladores é muito conveniente, desde que não envolva rigorosos problemas computacionais. O grau de simplicidade da implementação dos sistemas de controle *fuzzy* pode reduzir a densidade da complexidade para um ponto onde problemas intratáveis podem ser resolvidos (Favilla, 1993).

2.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS

- A lógica fuzzy faz parte da evolução da sistematização do raciocínio. A partir de seu surgimento torna-se possível quantificar expressões lingüísticas, propiciando, assim, o tratamento computacional de informações que estavam restritas a imprecisão da linguagem. A partir do surgimento deste ferramental, abre-se um leque de possibilidades para o tratamento de sistemas complexos, que são menos suscetíveis a modelagem matemática.
- Os conjuntos *fuzzy* herdaram muitas propriedades dos conjuntos ordinários, contudo existem propriedades que são inerentes aos conjuntos fuzzy, propriedades estas, que operam com a intensidade com que os elementos pertencem aos conjuntos, ou seja, a pertinência dos elementos. O rigor matemático, encontrado na lógica *fuzzy*, permitiu a elaboração dos chamados controladores *fuzzy*. A utilizando dessa lógica, em sistemas complexos, procura facilitar o entendimento e conseqüentemente sua modelagem uma vez que, não se faz necessário à utilização de modelos matemáticos pouco amistosos. Como exemplo de área do conhecimento em que a Lógica *Fuzzy* tem sido bastante explorada pode-se citar o controle de tráfego.

3 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

Este capítulo trata de controladores *fuzzy* e de controladores semafóricos *fuzzy*, apresentando suas características principais. Quanto aos controladores semafóricos *fuzzy*, busca-se mostrar quais são as funções de pertinência mais utilizadas nestes dispositivos. Por fim, é mostrado qual controlador será adaptado para a realização deste estudo.

3.1 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

As interseções, devido ao alto fluxo de veículos e pedestres provenientes de diferentes aproximações, são complexas, pois todos estes elementos tendem a dividir o mesmo espaço físico para a circulação. Assim, a interseção é uma região com um alto potencial para a ocorrência de acidentes. Destarte, torna-se necessário constituir normas de controle para definir o direito de passagem e assim diminuir o número de acidentes e melhorar a fluidez do tráfego.

Através da atuação semafórica consegue-se uma boa ordenação da fluidez do tráfego. Esta ordenação se dá de forma sequencial e cíclica, uma vez que é permite a cada corrente de tráfego realizar a travessia da interseção em um período específico de tempo, sem que ocorra simultaneamente a permissão de movimentos conflitantes. O Manual de Semáforos do DENATRAN (1984), define o controlador semafórico como um dispositivo que envia aos grupos focais dos semáforos, comandos através de pulsos elétricos para as mudanças de cores das indicações luminosas, autorizando a movimentação dos veículos de acordo com os planos semafóricos estabelecidos.

Segundo Homburger *et al.* (1996) as principais tarefas que podem ser realizadas pelos semáforos, se estes forem corretamente projetados e efetivamente operados são:

- ordenar o movimento de tráfego através do direito de passagem;
- providenciar o fluxo progressivo para o fluxo de tráfego de determinada rota ;
- reduzir o estresse da dificuldade de realização de manobras em interseções operando próximas da capacidade;
- eliminar ou reduzir conflitos de fluxo de tráfego que possam produzir acidentes;
- permitir economia através de redução de fiscalização por agentes de trânsito;

- prover movimento contínuo e ordenado do fluxo de tráfego na velocidade definida ao longo de uma rota, através da operação coordenada.

Caso erros técnicos ocorram através de implantações dos semáforos de forma inadequada ou por razões injustificadas, pode-se enumerar as seguintes desvantagens:

- aumentar o atraso na interseção e o consumo de combustível, principalmente em horário de pico;
- induzir ao uso de rotas alternativas menos adequadas;
- aumentar a frequência de colisões traseiras;
- irritação do motorista.

3.2 CONCEITOS GERIAS

O Manual de Semáforos do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 1984) apresenta os seguintes conceitos básicos para o dimensionamento do semáforo:

- a) Movimentos: caracterizam a origem e o destino dos veículos e/ou pedestres na interseção, podendo ser conflitantes quando se cruzam numa interseção; convergentes quando têm origens diferentes e mesmo destino ou divergentes quando têm a mesma origem e destinos diferentes;
- b) Ciclo: tempo em segundos para uma seqüência completa de todas as indicações luminosas oferecidas aos vários grupos focais;
- c) Fase: seqüência de cores (indicações luminosas) aplicada a uma ou mais faixas de tráfego, durante o ciclo, recebendo simultaneamente indicações idênticas do semáforo;
- d) Estagio: período de tempo em que as indicações luminosas não mudam de aspecto, para um ou mais movimentos;

- e) Período entre verdes: tempo entre o final do verde da fase que está perdendo o direito de passagem, para o início do verde da fase que está ganhando, usualmente 3 a 5 segundos;
- f) Intervalo: é uma porção do ciclo durante a qual a indicação do semáforo é constante;
- g) Offset (defasagem): é o intervalo de tempo entre um ponto de referência definido para o sistema e o ponto de início do ciclo em cada semáforo que compões o sistema. O *offset* de um semáforo relativo outro é definido como o intervalo de tempo entre seus inícios do tempo de verde para a mesma corrente de tráfego. Ou seja, é o retardo entre o início do sinal verde das indicações a montante e a jusante.

3.2.1 Classificação dos Controladores Semafóricos

O DENATRAN, 1984 define controlador semafórico como um equipamento que “comanda o semáforo através do envio de pulsos elétricos para comutação das luzes dos focos. A determinação dos instantes em que os pulsos devem ser enviados pode ser feito manualmente ou automaticamente”. Nos dias atuais são utilizados os controladores automáticos que podem atuar de diferentes formas.

Com o desenvolver da tecnologia, aplicada a controladores semafóricos, houve a necessidade de padronizar os modelos de controladores de uma forma mais simplificada, deste modo os controladores são classificados, basicamente, em dois tipos: controlador de tempo fixo e controlador atuado (Kell e Fullerton, 1991).

3.2.1.1 Controladores semafóricos de tempo fixo

Nestes controladores o comprimento do ciclo, as fases e os intervalos são fixos, podendo ter programações fixas diferenciadas ao longo do dia, a fim de atender diferentes condições de volume de tráfego em períodos pré-determinados. A determinação destes parâmetros é feita em função das características e volume médios do tráfego do cruzamento em questão. Estes controladores são simples e relativamente baratos, e são aconselhados para interseções que operam próximo da capacidade ou para uso em sistemas coordenados (Webster e Cobbe, 1966).

3.2.1.2 Controladores semafóricos atuados pelo tráfego

Os controladores semafóricos atuados operam de modo que os períodos de verde são relacionados às flutuações de tráfego, usando detectores nas aproximações, que transmitem as informações ao controlador. Podem variar o ciclo e os tempos de verde em resposta aos dados dos detectores, alterar a ordem e a sequência das fases, assim como pular ou omitir fases que eventualmente não sejam necessárias em determinados ciclos.

Os controladores atuados são mais complexos que os de tempo fixo, devido ao fato de serem providos de detectores de veículos e de lógica de decisão. São recomendados para interseções com grandes flutuações de volume durante o dia ou para interseções relativamente isoladas com grande número de aproximações ou maior quantidade de fases, operando perto da saturação em todas as aproximações (Kell e Fullerton, 1991).

3.2.2 Princípio da Extensão

O controle atuado utiliza amplamente o princípio da extensão, utilizando três parâmetros de tempo, conforme pode ser observado na Figura 3.1.

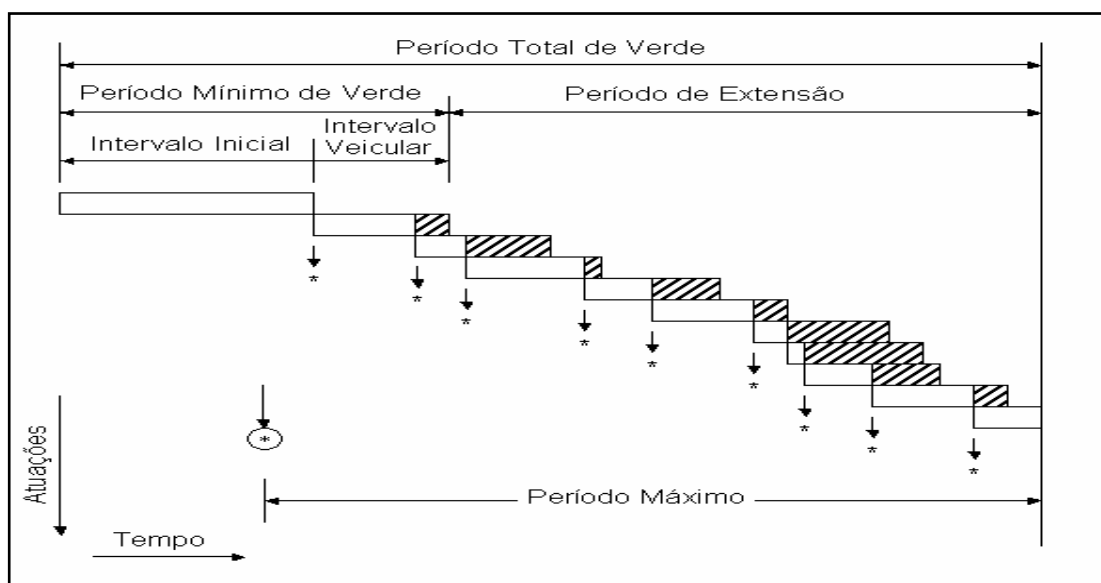


Figura 3.1: Esquema de intervalos de fase atuados (adaptado de Kell e Fullerton, 1991)

Sendo:

- * atuação de detector em fase com preferencial
-  porções vigentes de intervalos de veículo ou passagem de tempo
-  atuação de detector em uma fase contraditória

- a) Período mínimo de verde: é composto pela soma dos tempos do intervalo inicial e o intervalo veicular. Este tempo é requerido para atender com segurança pelo menos um veículo.
- b) Intervalo veicular: consiste no intervalo de tempo entre atuações sucessivas que permite que o verde seja mantido. Este tempo é contado após cada detecção.
- c) Intervalo máximo: período máximo de tempo que o verde pode ser mantido, contado a partir da atuação na aproximação que está recebendo o vermelho.

Deste modo, o período mínimo de verde que é composto pelo intervalo inicial e pelo intervalo veicular é dado para um único veículo. Se outros veículos forem detectados durante o intervalo veicular um outro intervalo veicular será dado. Este processo irá se repetir até que seja atingido o tempo máximo de verde, ou até que aconteça um intervalo entre uma detecção e outra maior que o intervalo veicular do controlador.

3.3 MODELOS DE CONTROLE SEMAFÓRICO POR DEMANDA DE TRÁFEGO

Existem alguns modelos consagrados de estruturas de controle de semafórico, que são também chamados de estratégia de controle. Dentre estas estratégias podemos destacar as seguintes: MOVA, LHOVRA, SOS, SPOT e o SCOOT.

a) Mova

A *Transport and Road and Research Laboratory* – TRRL desenvolveu entre os anos de 1982 e 1988 uma estratégia de controle denominada por *Microprocessor Optimised Vehicle Actuation* - MOVA. O principal objetivo deste modelo é realizar um controle de tráfego mais flexível para as interseções isoladas do que o apresentado pelo controle de tempo fixo.

Os detectores utilizados no MOVA estão dispostos da seguinte forma:

detectores **IN** (de entrada), a 8,0 segundos livre da faixa de retenção, com a velocidade livre (70 km/h, à 150m);

detectores **X** em torno de 3,5 segundos (70 Km/h à 45m);

detectores **OUT** (de saída), perto da linha de retenção. Estes detectores adicionais (OUT) podem ser necessários se houver dissipadores (saídas) ou fontes de tráfego entre o detector (IN) e a linha de retenção.

Os tamanhos e as posições do laço são escolhidos de modo que um veículo na pista seja detectado com uma probabilidade elevada, no entanto, sem considerar os veículos das pistas adjacentes. Os dados capturados pelos detectores são analisados em tempo real por um microprocessador que executa o programa de controle MOVA. Toda operação da estratégia consiste em buscar principalmente a minimização dos atrasos e do número de paradas, contudo se ocorrer a saturação da aproximação o MOVA procurará maximizar a capacidade (Rochester, 1991).

A estratégia de controle MOVA é uma mistura de otimização matemática e algoritmos heurísticos. Quando um estágio começa pelo tempo de verde, há quatro etapas consecutivas:

O tempo de verde mínimo absoluto, definido para cada estágio (normalmente 7 segundos no Reino Unido) e um para cada *link*.

Uma variável “tempo de verde mínimo” cuida dos veículos que estão entre o detector X e a linha de retenção.

O estágio é mantido verde enquanto pelo menos um *link* relevante esteja descarregando no fluxo de saturação.

Quando é observado o fim do fluxo de saturação para todos os *links* relevantes, o processo de otimização inicia. A razão por esperar para iniciar o processo de otimização é que a simulação mostra que o atraso mínimo é usualmente alcançado se o fluxo recebe o verde suficiente para eliminar a fila completamente. O algoritmo de otimização é inspirado no algoritmo de Miller (Kronborg et al., 1997), embora seja mais complexo.

Existem tempos de verde máximos para cada estágio, e são normalmente elevados e inalcançáveis. Há também um valor máximo para o comprimento do ciclo, limitado, por exemplo, pelo tempo de espera dos pedestres, onde o MOVA decide a repartição de verde para este ciclo.

Na otimização MOVA usa-se um modelo microscópico do tráfego. A posição de cada veículo é prevista entre o detector IN e a linha de retenção. A cada meio segundo o MOVA realiza um cálculo para verificar se o total de atraso será minimizado em função do comprimento do estágio corrente de verde (Kronborg, 1992).

Durante condições de supersaturação, quando uma ou mais aproximações se apresentam com fila significativa ao final do tempo de verde, a estratégia MOVA reconhece isto automaticamente passando a utilizar um algoritmo heurístico para maximizar a capacidade. Alguns testes de campo realizados pelo TRRL mostram uma média de redução do atraso de até 13% e em alguns casos, podem exceder 25% de redução (Rochester, 1991).

A principal desvantagem desta estratégia é o controle baseado em estágio, reduzindo a flexibilidade. Os retratos secundários das fases têm que ser definidos com estágios, sem a flexibilidade plena que advém do controle do grupo semafórico, com a demanda expressa para cada estágio e não por grupo.

Antecede a programação de controle MOVA as decisões sobre estágios, seqüências de estágios e funções de demanda. A mudança entre as três séries de dados é feita no tempo e não de acordo com volumes reais de tráfego.

b) LHOVRA

A estratégia de LHOVRA foi desenvolvida originalmente para aumentar a segurança e reduzir atrasos e número de veículos parados em interseções semaforizadas nas estradas com velocidade regulamentar de 70 Km/h. Esta estratégia reúne um conjunto de funções da engenharia de tráfego baseado no controle sueco tradicional por grupo semafórico, cabendo ao engenheiro de tráfego escolher as que são apropriadas para uma interseção específica. Contudo, a utilização desta estratégia não implica na eliminação das paradas, mas numa redução destas quando comparadas com outras modalidades de controle semafórico (Kronborg, 1992).

O LHOVRA utiliza uma estrutura pré-concebida de detectores de tráfego afixados sobre um trecho da via localizados a 300 metros da interseção controlada (ZIR, 2004). Assim, sua estrutura foi arquitetada identificar qualquer veículo pesado que cruza a linha de 300m da interseção, a fim de promover o controle do tráfego.

O nome LHOVRA deriva das sete funções que esta estratégia executa. São elas:

L – Prioridade de Caminhões, ônibus e pelotões

H – Prioridade da Via principal
O – Redução de acidentes
V – Amarelo variável
R – Redução de infrações do sinal vermelho
A – Sequência Verde – Vermelho – Verde

Como desvantagem do LHOVRA pode-se citar o fato das extensões serem feitas da mesma maneira não obstante quantos sejam os veículos que estão esperando no vermelho. Isto nem sempre é ótimo, especialmente quando se aproximam pelotões de um grupo semaforico verde durante o fim do verde.

Na direção mais carregada, durante situações de supersaturação, a extensão extra pós-verde não ajuda sempre porque, freqüentemente, todo tempo de verde máximo e toda extensão extra pós-verde serão consumidos. O LHOVRA não tem nenhum detector inteligente verificando as funções, nem a base de dados do tráfego.

c) SOS

O Self Optimized Signal (SOS) é uma estratégia de para interseções isoladas desenvolvida a partir de 1992. Trata-se de um projeto que herda as funções da estratégia de controle do LHOVRA.

De forma geral, o projeto SOS busca avançar por meio da identificação de problemas no LHOVRA pela comparação com outras estratégias e a simulação de campo, procura, também, para interseções isoladas, combinar a tradição Escandinávia de controle de grupos de sinal com otimização matemática. Seu funcionamento se dá através da tradução de riscos de paradas e formação de fila em um algoritmo de custo, sendo que o fator segurança é altamente significativo no processo lógico do controle. Segundo Tignor (1999), o principal objetivo desta estratégia é encontrar o tempo mais adequado para finalização da fase reduzindo assim a possibilidade de um veículo parar na sinalização amarela quando os veículos atrás deste vem a altas velocidades, aumentando a possibilidade de ocorrência de um acidente.

Como principal desvantagem, esta estratégia não é adequada para situações de fluxo de tráfego extremamente baixos, tais como as condições noturnas de algumas interseções.

d) SPOT

A estratégia de controle semafórico desenvolvida pela *Mizar Automiazione*, em Turim, Itália. Sua idéia principal é calcular os tempos semafóricos que minimizem atrasos e número de paradas de veículos, além de priorizar o fluxo para ônibus e trens. O SPOT foi desenvolvido para atuar por estágios. Além disso, seu diferencial é a capacidade de efetuar cálculos em tempo real e ter inteligência descentralizada, ou seja, em cada interseção é um sub-problema específico. A partir daí, é criado um controle de feedback e regras consistentes para as interações entre as interseções. De modo a garantir estabilidade e robustez para a rede, interações são definidas em nível centralizado ou com um plano de referência.

E) SCOOT

Segundo Jayakrishnan (2000), o SCOOT (Split, Cycle and Offset Optimization Technique) é uma ferramenta para gerenciamento e controle de Tráfego em áreas urbanas, sendo adaptável por responder automaticamente às flutuações no tráfego através do uso de detectores fixados nas vias.

O sistema SCOOT busca minimizar os comprimentos da fila e o atraso na área de interesse. Em redes mais extensas a operação do SCOOT se dá em sub-áreas bem definidas com o propósito de modelagem e otimização. A modelagem e previsão do tráfego são baseadas na filosofia de controle de tempo fixo. É empregado um otimizador heurístico baseado na avaliação de plantas potenciais de sincronismo ajustando o tempo de verde, o comprimento do ciclo e os *off-sets*. Os off-sets e os tempos de verde são ajustados somente por quatro segundos cada ciclo, e os ajustes do comprimento do ciclo são relativamente lentos (SCOOT-UTC, 2001).

O SCOOT divide o tempo em intervalos pequenos, geralmente quatro segundos. A entrada das informações do ambiente de controle é realizada através dos detectores de tráfego. No sistema SCOOT é utilizado apenas um laço a montante da interseção, o qual fornece as informações de aproximação veicular que são utilizadas para atualizar os modelos do pelotão do tráfego no tempo real para a predição do controle.

A utilização do SCOOT além de proporcionar a redução dos atrasos e congestionamentos, fornece outras facilidades (SCOOT-UTC,2001), tais como:

priorização de vias de ônibus;

detecção de incidentes;

medição on-line de parâmetros como saturação da ocupação da via;

estimativas das emissões veiculares.

3.4 ESTRUTURA GERAL DE UM CONTROLADOR *FUZZY*

Com a utilização crescente da lógica *fuzzy* em processos de modelagem de controle, pode-se vislumbrar uma estrutura geral de um controlador *fuzzy*. Segundo Pedrycz (1994), ele é composto por três componentes básicos: interface de entrada, módulo de processamento e interface de saída.

No primeiro módulo, interface de entrada, ou fase de fuzificação (*fuzzyfication*), os dados gerados no meio são processados. No caso de dados numéricos, apesar de uma variedade de mecanismos igualmente utilizados, a transformação exercida nessa interface retorna como resultado para estes valores numéricos a pertinência associada a cada conjunto *fuzzy* associado às variáveis lingüísticas consideradas.

A interface de saída transladará o vetor de pertinência em um número real, sendo esse processo comumente denominado de fase de defuzificação (*defuzzyfication*).

O módulo de processamento determina a relação entre as variáveis de entrada e saída do sistema ou, mais especificamente, entre suas representações lingüísticas internas. É formado pela base de conhecimento e pela unidade lógica de tomada de decisão

Esquemáticamente, estes três módulos descritos por Pedrycz (1994), podem ser representados na forma indicada na Figura 3.1.

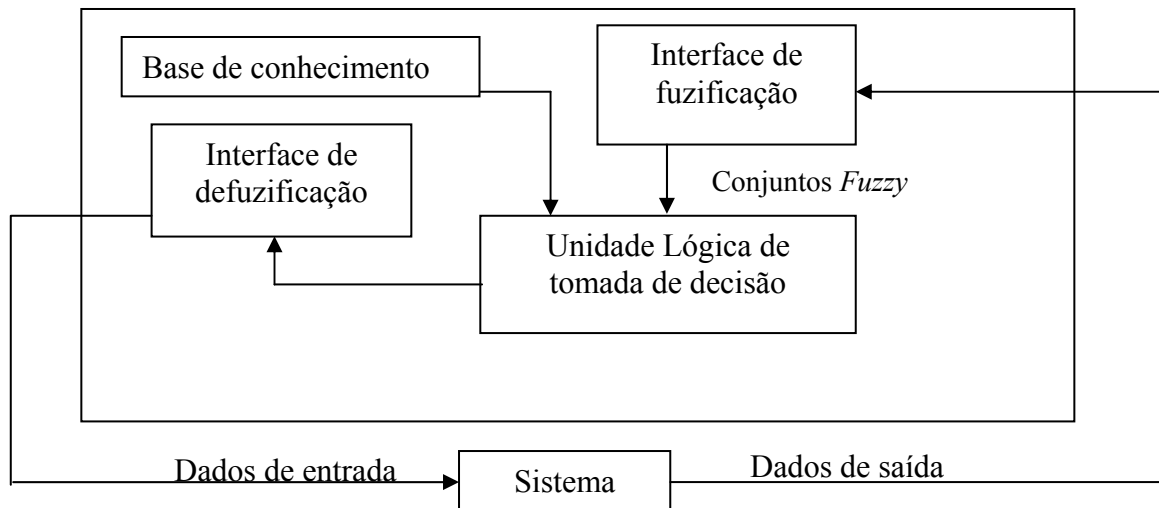


Figura 3.2: Esquema de um Controlador *fuzzy*

Fonte: Niittymäki, 1998

3.4.1 Interface de Fuzzificação

A fuzzificação está intrinsecamente relacionada à definição de atributos, ou seja, à definição das variáveis linguísticas, que por sua vez estão relacionadas ao estado do processo, caracterizadas pelas variáveis de entrada e pela variável associada à ação de controle. Cada variável linguística é associada a um universo de discurso, sendo que a partição deste universo é feita de acordo com os valores que a variável pode assumir. Estes valores correspondem aos conjuntos *fuzzy*.

Através da interface de fuzzificação os valores observados das variáveis de entrada são associados ao respectivo universo de discurso, permitindo uma avaliação do grau de pertinência aos conjuntos *fuzzy* associados a cada variável (Zadeh, 1973). Por exemplo: considere $x_0 \in R$ transformado, via fase de fuzzificação, nos conjuntos A_i 's; o produto desta fase é um vetor no intervalo $[0, 1]^n$. Este vetor, de forma geral, pode ser representado da seguinte forma $[\mu_{A_1}(x_0), \mu_{A_2}(x_0), \mu_{A_3}(x_0) \dots \mu_{A_n}(x_0)]$, onde $A_1, A_2, A_3, A_4, \dots A_n$ correspondem a conjuntos *fuzzy* da interface de entrada. Estes conjuntos são referidos como partição do universo de discurso (Pedrycz, 1994).

3.4.2 Base de Conhecimento

A base de conhecimento é formada por um conjunto de instruções *fuzzy* que, ao serem processadas, produzem uma solução aproximada para um determinado problema. O conjunto de regras *fuzzy* deve refletir a política de controle e suas metas (Zadeh, 1973).

A definição do conjunto de regras *fuzzy*, usualmente, baseia-se na experiência dos operadores e no conhecimento do engenheiro de controle. Contudo, segundo Santos *et al* (2004), pode-se encontrar na literatura estudos que buscam a definição das regras de controle para diferentes aplicações a partir do processo de aprendizado.

3.4.3 Lógica de Tomada de Decisão

Os controladores *fuzzy* têm sido desenvolvidos no contexto da inferência *fuzzy* e de acordo com a regra de implicação *modus ponens* generalizada. Essa regra pode ser definida como o processo que irá “conduzir” os dados para que a Lógica de Tomada de Decisão realize a inferência. Como exemplo pode-se apresentar:

Entrada: X é A' e Y é B'

Regra: Se X é A_i e Y é B_i então Z é C_i

Consequência: Z é C'_i

Onde: X e Y são variáveis linguísticas que relatam o estado do processo; Z é a variável linguística de controle; A', A_i, B', B_i, C'_i, C_i são conjuntos *fuzzy* de X, Y, Z nos universos de discurso U, V, W, respectivamente.

A regra *modus ponens* generalizada originará a consequência através dos dados de entrada e da premissa que, por sua vez, é definida pela parte condicional da regra (Jacques *et al.*, 2002b). A agregação de diferentes regras *fuzzy* produz o comportamento do controlador *fuzzy*. Para a implementação de cada regra e obtenção da função resultante, é necessária a utilização de operadores lógicos, cuja seleção deve ser precedida de uma avaliação a fim de certificar qual o melhor operador para cada caso. Para implementar a função de implicação *fuzzy* são empregadas, usualmente, a regra de operação definida por Mamdani que utiliza o operador “interseção” e a regra de operação definida por Larsen que emprega o operador “produto algébrico”.

3.4.4 Processo de Defuzificação

O algoritmo de controle faz com que o processamento das variáveis lingüísticas de entrada resulte em um valor da variável lingüística de saída. Assim, o processo de defuzificação consiste em selecionar um valor numérico específico que represente o resultado *fuzzy* da variável de saída produzido pelo conjunto de regras *fuzzy*. A escolha de um método de defuzificação pode ter um impacto significativo na resposta produzida por um controlador *fuzzy*.

Os métodos de defuzificação freqüentemente utilizados são: Critério Máximo, Método Centro de Gravidade, Bissetor da Área, Método dos Máximos e o Mínimo do Máximo (Jacques *et al.*, 2002b).

3.5 CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O controlador de tráfego desenvolvido com a utilização da lógica *fuzzy* tem seus procedimentos de cálculo relativamente simples, visto que utiliza um pequeno número de parâmetros. Assim, os controladores baseados em lógica *fuzzy* são projetados com o propósito de capturar os fatores chave para promover o controle do processo, sem a necessidade do conhecimento de funções matemáticas relativas a esse processo. Esses fatores contribuem para o sucesso de controladores *fuzzy* em aplicações em tempo real (Jacques *et al.*, 2002a).

Segundo Gadêlha *et al.* (1999), o controlador semafórico *fuzzy* é um equipamento que estabelece o controle semafórico do tipo atuado baseado no princípio da extensão, e é adaptativo em relação às flutuações das condições do tráfego.

O trabalho de Pappis e Mamdani (1977) foi o primeiro a aplicar a lógica *fuzzy* no controle de tráfego através da estratégia semafórica. Este dispositivo foi projetado para controlar uma interseção de duas vias de sentido único, com duas faixas de trânsito, não permitindo movimentos de conversão. Este controlador considera que as chegadas dos veículos na interseção ocorrem de maneira randômica e são distribuídas uniformemente. O tempo total perdido por ciclo é igual a 10 segundos. O controlador é ativado a cada 10 segundos durante cada fase efetiva de verde, sendo que a primeira intervenção ocorre aos 7 segundos (tempo mínimo de verde), com sistema executando 5 intervenções no máximo. Cada intervenção pode variar de 1 a 10 segundos. No entanto, se uma intervenção é calculada

para ser menor que 10 segundos, não será possível realizar outra interferência, ou seja, a fase será finalizada ao final deste tempo. Isto acarreta um tempo de máximo de verde possível de 57 segundos para uma aproximação. 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.

Características como variáveis, números de conjuntos *fuzzy* para cada variável e a forma das funções de pertinência estão retratadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Características do controlador semafórico de Pappis e Mamdani (1977)

Variáveis/entrada	Significado	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Chegada	Diz respeito ao número de veículos que chegam na aproximação que está sendo servida.	Foram considerados 5 conjuntos <i>fuzzy</i> diferentes, variando desde “nenhum veículo” até “uma quantidade excessiva de veículos”	Todas as funções utilizadas foram trapezoidais ou triangulares
Fila	Diz respeito ao número de veículos que estão na fila recebendo a indicação semafórica vermelha.	Foram considerados 6 conjuntos <i>fuzzy</i> , definidos entre “muito pequena” até “muito longa”	
Variáveis/saída	Significado	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Tempo de verde	Duração efetiva do tempo de verde	Foram considerados 5 conjuntos <i>fuzzy</i> diferentes variando desde “muito curto” até “muito longo”	Todas as funções utilizadas foram trapezoidais ou triangulares
Extensão do tempo de verde	É o prolongamento do tempo de verde	Foram considerados 6 conjuntos <i>fuzzy</i> definidos entre “muito curta” até “muito longa”	

Nas seções a seguir são apresentados alguns dos outros controladores *fuzzy* descritos na literatura.

3.5.1 Controlador de Chiu

Chiu (1992) apresentou um modelo de controle semafórico *fuzzy* em que a lógica *fuzzy* é aplicada em uma pequena rede semafórica. Na proposta geral desse trabalho, cada interseção opera de forma independente das demais, ou seja, os parâmetros de tempo de cada interseção são ajustados com base nas informações locais e são coordenados apenas com as interseções adjacentes a elas. O mesmo conjunto de regras é utilizado para controlar os parâmetros de tempo das interseções que fazem parte da rede.

O fato das regras, que são responsáveis por ajustar o tempo de ciclo, as fases e os offsets, estarem alocadas separadamente, acarreta uma notável simplificação na base de regras. O controlador foi estruturado com 6 variáveis e 19 conjuntos *fuzzy*.

Segundo Chiu (1992), a simulação utilizando o sistema *fuzzy* apresentou uma grande eficiência na redução dos atrasos. Por meio dos estudos realizados observou-se que o número de interseções “inteligentes” é limitado se elas forem operadas com tempos de ciclo muito diferentes. Características como variáveis, número de conjuntos *fuzzy* para cada variável e a forma das funções de pertinência estão retratadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Características do controlador semafórico de Chiu

Variáveis de entrada para ajuste do ciclo	Significado	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Highest_sat	É o maior grau de saturação dentre as aproximações em geral	Foram considerados 7 conjuntos <i>fuzzy</i> diferentes variando desde “nenhum” até “saturado”	Todas as funções utilizadas foram triangulares
Cross_sat	É o maior grau de saturação entre as aproximações competidoras		
Dado de saída	Valor do ajuste do tempo de saída		

Fonte: adaptado de Andrade (2004)

Tabela 3.2: Características do controlador semafórico de Chiu (continuação)

Variáveis de entrada para ajuste da fase	Significado	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Sat_diff	Diferença entre o maior grau de saturação do sentido leste-oeste e o maior grau de saturação do sentido norte-sul	Foram considerados 7 conjuntos <i>fuzzy</i> diferentes variando desde “nenhum” até “saturado”	Todas as funções utilizadas foram triangulares
Highest_sat	É o maior grau de saturação dentre todas as aproximações		
Dado de saída	Valor do ajuste do tempo de verde da aproximação no sentido leste-oeste		
Variáveis de entrada para ajuste do offset	Significado	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Vol_diff	Diferença normalizada entre o volume de tráfego da aproximação principal e a média dos volumes das demais aproximações	Foram considerados 5 conjuntos <i>fuzzy</i> diferentes variando desde “nenhum” até “muito alto”	Todas as funções utilizadas foram triangulares
Req_adj	Tempo de ajuste requerido relativo ao tempo ajustável		
Dado de saída	O ajuste do tempo permitido		

Fonte: adaptado de Andrade (2004)

3.5.2 Controlador de Czogalla

O modelo de controlador proposto por Czogalla (1997) visa a orientar as fases do controlador semafórico atuado, em vias onde há a priorização do transporte público. O autor almejou mostrar a eficiência do controlador semafórico *fuzzy* para interseções complexas (via arterial de mão dupla e controlador multifásico).

A Tabela 3.3 procura resumir as seguintes características deste controlador: variáveis utilizadas, número de conjuntos *fuzzy* e as formas das funções de pertinência.

Tabela 3.3: Características do controlador semafórico de Czogalla

	Variáveis	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções de pertinência	Significado
Variáveis de entrada	Det1, Det2, Det3, Det4, Det5	12 conjuntos <i>fuzzy</i>	Funções triangulares	Valores médios de ocupação veicular
Variáveis de Saída	Next	nenhum conjunto <i>fuzzy</i>	_____	É a resposta à mudança de fase: SIM – muda de fase NÃO – permanece na fase corrente

Fonte: adaptado de Andrade (2004)

3.5.3 Controlador de Favilla

O controlador semafórico *fuzzy* proposto por Favilla foi projetado para atuar em uma única interseção de duas vias principais, sendo que uma via tem duas faixas de trânsito e a outra três. Basicamente, este controlador compara as “chegadas veiculares” da aproximação que está recebendo a indicação de verde, com a “fila de espera” na via que recebe vermelho. O tempo de verde pode ser incrementado por intervenções (extensões) que variam de 0 a 10 segundos.

As intervenções executadas pelo controlador no tempo de verde são efetuadas 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. Sensores instalados na vias permitem que o controlador tenha informação dos veículos que devem chegar na aproximação nos próximos 10 segundos. As variáveis de entrada para o algoritmo *fuzzy* do controlador são geradas por um estimador que calcula as velocidades dos veículos e estima seus tempos de passagem pela interseção. A Tabela 3.4 resume as seguintes características deste controlador:

variáveis utilizadas, número de conjuntos *fuzzy* e as formas das funções de pertinência. Este modelo apresenta um diferencial, que é a capacidade de modificar de forma on-line as funções de pertinência definidas inicialmente para a variável Extensão.

Tabela 3.4: Características do Controlador Semafórico de Favilla

	Variáveis	Significado	Nº de conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Variáveis de Entrada	Chegada	Chegada de veículos na aproximação que está recebendo a indicação verde	4 conjuntos: quase nada, pouco, muito, muito mais	Triangulares
	Fila	Chegada de veículos na aproximação que está recebendo a indicação vermelho	4 conjuntos: quase nada, pouco, muito, muito mais	
Variáveis de Saída	Extensão	Extensão a ser dada ao tempo de verde corrente	4 conjuntos: muito curta, curta, média, longa	Triangulares

Fonte: Adaptado de Andrade (2004)

3.5.4 Controlador de Gadêlha

Este controlador semafórico é um modelo que propõe o ajuste dos tempos de verde de uma interseção isolada que opera sob dois estágios (fases). Tanto a variável de entrada como a de saída, bem como as regras de inferência *fuzzy*, foram definidas a partir de dados de uma contagem volumétrica de 24 horas realizada num dia típico da cidade de Fortaleza (Andrade, 2004).

A Tabela 3.5 procura resumir as seguintes características deste controlador: variáveis utilizadas, número de conjuntos *fuzzy* e as formas das funções de pertinência.

Tabela 3.5: Características do Controlador semafórico de Gadêlha

	Variáveis	Significado	Nº de conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Variáveis de Entrada	Fluxo de veículos em ambas as aproximações	Quantidade de Veículos/tempo	5 conjuntos: pequeno, médio pequeno, médio, médio grande, grande	Trapezoidal e triangular
Variáveis de saída	Tempo de verde em ambas as aproximações	Duração do tempo de verde aferido em segundos	5 conjuntos: pequeno, médio pequeno, médio, médio grande, grande	

Fonte: Adaptado de Andrade (2004)

3.5.5 Controlador de Trabia

Este controlador foi projetado para operar com 4 fases de controle em uma interseção isolada. Para cada aproximação são definidos os movimentos à frente e conversão à esquerda, onde há duas faixas para os movimentos à frente e uma faixa para a conversão à esquerda. A Tabela 3.6 resume as seguintes características deste controlador: variáveis utilizadas, número de conjuntos *fuzzy* e as formas das funções de pertinência.

Tabela 3.6: Características do controlador semafórico de Trabia

	Variáveis	Nº de conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Variáveis de Entrada	Fluxo máximo de aproximação durante o intervalo Δt .	4 conjuntos: zero, pequeno, médio, grande	Trapezoidal
	Comprimento máximo da fila em Δt , veic/s/faixa	4 conjuntos: zero, pequeno, médio, grande	
	Intensidade do tráfego no verde em Δt , veic/s/faixa	4 conjuntos: zero, pequeno, médio, grande	
	Intensidade do tráfego no vermelho em Δt , veic/s/faixa	4 conjuntos: zero, pequeno, médio, grande	Trapezoidal
Variáveis de saída	Extensão, que não é propriamente uma variável lingüística. $E = -1$ (não dar extensão de verde); $E = +1$ (dar extensão de verde)		

Fonte: Adaptado de Andrade (2004)

3.5.6 Controlador de Niittymäki e Pursula

Este controlador exerce o controle de duas fases, em interseções isoladas de duas vias de sentido único. Pode ser utilizado em interseção isolada de duas vias de sentido duplo, não havendo restrições quanto ao número de faixas por aproximação.

Segundo Andrade (2004), a lógica *fuzzy* atua no controlador proposto por Niittymäki e Pursula em dois sentidos: para selecionar a sequência de fases (seletor *fuzzy*) e para determinar o valor das extensões de verde (extensor *fuzzy*). O processo de atuação da lógica utiliza um fator específico *fuzzy* que indica a necessidade de verde para cada fase.

O conjunto *fuzzy* relativo à extensão é do tipo *singleton*, ou seja, um conjunto que tem um único elemento com grau de pertinência igual a 1.

A Tabela 3.7 mostra as seguintes características deste controlador: variáveis utilizadas, número de conjuntos *fuzzy* e as formas das funções de pertinência.

Tabela 3.7: Características do controlador semafórico de Niittymäki e Pursula

	Variáveis	Conjuntos <i>fuzzy</i>	Forma das funções
Variáveis de Entrada	Nº de veículos que chegam durante o verde	4 conjuntos: zero, pouco, médio, muito	Trapezoidal e Triangular
	Nº de veículos em fila no vermelho	3 conjuntos: pouco, médio, muito longo	
Variáveis de saída	Extensão do tempo de verde corrente	4 conjuntos <i>fuzzy</i> : zero, curto, médio, longo	Singleton

Fonte: Adaptado de Andrade (2004)

3.5.7 Controlador usado em estudos sobre Controladores Semafóricos *Fuzzy*

O controlador de Niittymäki e Pursula foi adaptado para a realização de diversos estudos relacionados aos diferentes componentes da estrutura de um controlador semafórico *fuzzy* para interseções isoladas. Dentre eles, pode-se destacar:

- conectores usados para implementar as regras *fuzzy* (Jacques *et al.*, 2002a);
- métodos de defuzificação (Jacques *et al.*, 2002b);
- partição de universo de discurso das variáveis lingüísticas (Santos, 2003).

As regras *fuzzy* foram constituídas na forma “Se – Então”. Para avaliá-las utilizou-se o operador interseção (mínimo). A Tabela 3.8, mostra as regras do tipo:

“SE fila _____ E chegada _____ ENTÃO extensão _____”

Tabela 3.8: Regras *fuzzy* implementadas no controlador de estudo

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

Fonte: Santos (2003)

Este controlador também será utilizado para o estudo do impacto das diferentes formas de função de pertinência sobre a resposta do controlador e sobre o desempenho do tráfego controlado. Ele será apresentado no Capítulo 5, onde são também detalhadas as variáveis lingüísticas nele empregadas.

3.6 TÓPICOS CONCLUSIVOS

- Neste capítulo, pode-se constatar que as funções de pertinência utilizadas nos controladores semafóricos *fuzzy* são sempre as funções triangulares e trapezoidais. Isto indica, que se faz mister investigar os impactos que outras funções de pertinência causam na resposta dos controladores.
- Em geral o controlador *fuzzy* tem provado ser um efetivo e sistemático caminho para resolver problemas em que se procura alcançar vários objetivos. O controle de tráfego se constitui em uma problemática com este perfil, uma vez que, invariavelmente o projetista ao executar o controle do tráfego, dentre outras coisas, tentará obter resultados como: maximização da segurança do tráfego, minimização dos atrasos e minimização do consumo de combustível. Segundo Niittymäki e Nevalla (2001), o

controlador semafórico *fuzzy* tem se mostrado tão ou mais eficaz que o método de controle atuado tradicional.

4 FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Um conjunto ordinário tem dois valores para a função característica, zero ou um, enquanto os conjuntos *fuzzy* têm o intervalo $0 \leq x \leq 1$ (Zadeh, 1965). A função que associa a cada elemento de um conjunto *fuzzy* “A” a medida de sua pertinência a esse conjunto é denominada função de pertinência. Nesse capítulo são apresentados os principais tipos de funções de pertinência que podem ser empregadas para a caracterização dos conjuntos *fuzzy*, juntamente com algumas características dessas funções. A realização do estudo apresentado nesse capítulo é um dos objetivos específicos do presente trabalho.

4.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS

A função de pertinência, $\mu(x)$, é a responsável por associar os números reais contidos no intervalo $0 \leq x \leq 1$ aos elementos $x \in “A”$, dando assim, o grau de pertinência do elemento x no conjunto “A”. A pertinência de um elemento em relação a determinado conjunto deve ser entendida como a "intensidade" com que este elemento está relacionado a tal conjunto. A realização do estudo apresentado nesse capítulo é um dos objetivos específicos do presente trabalho.

A definição da função de pertinência é bastante subjetiva, pois uma função especificada para um mesmo conceito pode apresentar resultados variados se for definida por diferentes pessoas. Além de definir o quanto certo elemento pertence a determinado conjunto, a função de pertinência também serve para representar os limites de um conjunto *fuzzy*. Para determinar a forma de variação e os limites de cada um destes conjuntos, deve-se definir a função de pertinência adequadamente.

As funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* podem assumir diversas formas, sendo a função trapezoidal, ou um de seus casos particulares, a função triangular, o tipo de função mais utilizada. Usualmente uma função trapezoidal é expressa através de quatro parâmetros, que descrevem os quatro vértices do trapézio que representa a função. Na função trapezoidal existem dois parâmetros com pertinência igual a um, ao passo que na triangular existe apenas um parâmetro com esse grau de pertinência (Santos *et al.*, 2004). Outras funções podem ser utilizadas, e estão disponibilizadas em aplicativos que processam a lógica *fuzzy*, como é o caso do “Fuzzy Logic Toolbox” do programa MATLAB.

A função de pertinência triangular tem sido freqüentemente usada em muitas aplicações dos conjuntos *fuzzy*: controladores, modelos *fuzzy* e classificação de padrões. Talvez, a mais óbvia justificativa para sua utilização seja a simplicidade da função.

4.2 TIPOS DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

As funções que associam a cada elemento de um conjunto *fuzzy* a sua pertinência a esse conjunto podem assumir diferentes formas. Gupta *et al.*, (2003) apresentam os seguintes tipos de funções de pertinência:

- ✓ Função triangular
- ✓ Função trapezoidal
- ✓ Função gaussiana
- ✓ Função sino
- ✓ Função sigmoidal

O software MATLAB, que foi utilizado nessa dissertação para a implementação do controlador semafórico *fuzzy* (ver Capítulo 5), municia seus usuários com uma caixa de ferramentas de Lógica *fuzzy*, onde se encontram onze funções de pertinência. Essas funções são construídas a partir das seguintes funções básicas:

- ✓ Função Linear
- ✓ Distribuição Gaussiana
- ✓ Curva Sigmoidal
- ✓ Curvas Polinomial: quadrática e cúbica

Por convenção, todas as funções de pertinência têm as letras “mf” (*membership function*) no final de seus nomes. Na Tabela 4.1 são apresentados os nomes e o esboço dos gráficos das onze funções de pertinência disponibilizadas pelo MATLAB. Nas seções seguintes cada uma dessas funções é detalhada, juntamente com a indicação dos parâmetros a serem introduzidos no MATLAB para sua implementação. Com relação às expressões representativas das funções, “X” corresponde ao universo de discurso de cada variável lingüística, sendo “x”, os valores pertencentes a X.

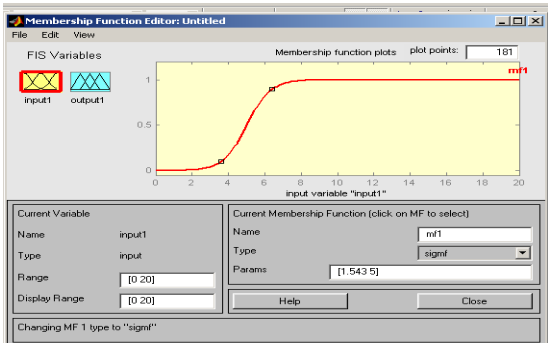
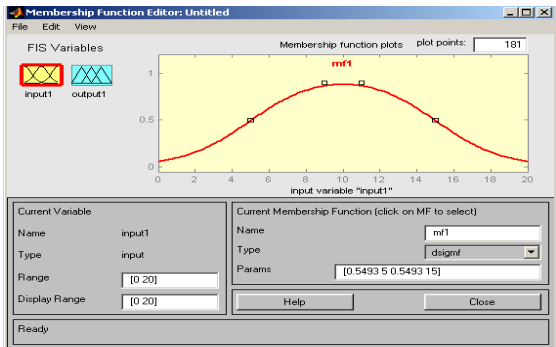
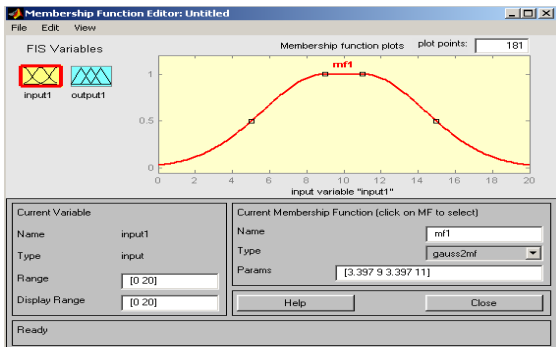
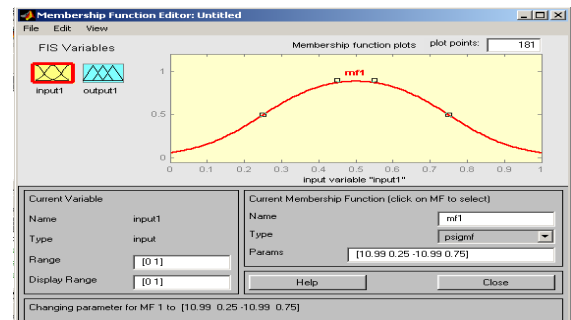
Tabela 4.1: Funções de Pertinência disponibilizadas no MATLAB

Denominação	Representação Gráfica
Função Triangular	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor. The plot area displays a triangular membership function labeled 'mf1' for the input variable 'input1'. The x-axis ranges from 0 to 20, and the y-axis (membership degree) ranges from 0 to 1. The triangle has vertices at (0,0), (10,1), and (20,0). The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'trimf', and parameters [0 10 20].
Função Trapezoidal	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor. The plot area displays a trapezoidal membership function labeled 'mf1' for the input variable 'input1'. The x-axis ranges from 0 to 20, and the y-axis ranges from 0 to 1. The trapezoid has vertices at (0,0), (1,0), (11,1), (19,1), and (20,0). The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'trapmf', and parameters [1 9 11 19].
Função forma de Z	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor. The plot area displays a Z-shaped membership function labeled 'mf1' for the input variable 'input1'. The x-axis ranges from 0 to 20, and the y-axis ranges from 0 to 1. The curve starts at (0,1), remains at 1 until x=11, and then decreases to (20,0). The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'zmf', and parameters [11 8 18 2].
Função forma de S	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor. The plot area displays an S-shaped membership function labeled 'mf1' for the input variable 'input1'. The x-axis ranges from 0 to 20, and the y-axis ranges from 0 to 1. The curve starts at (0,0), remains at 0 until x=5, and then increases to (20,1). The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'smf', and parameters [5 4 18 2].

Tabela: 4.1: Funções de Pertinência disponibilizadas no MATLAB (continuação)

Denominação	Representação Gráfica
Função forma de π	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a variable named 'input1'. The plot area displays a red curve representing a Pi-shaped membership function. The x-axis is labeled 'input variable "input1"' and ranges from 0 to 20. The y-axis represents the membership degree from 0 to 1. The curve starts at 0 at x=8, rises to 1 at x=9, remains at 1 until x=11, and then falls back to 0 at x=19. The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'pimf', and parameters '[1 9 11 19]'. The 'FIS Variables' panel shows 'input1' as the current variable with a range of [0 20].
Função Gaussiana	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a variable named 'input1'. The plot area displays a red curve representing a Gaussian-shaped membership function. The x-axis is labeled 'input variable "input1"' and ranges from 0 to 20. The y-axis represents the membership degree from 0 to 1. The curve is a bell shape centered at x=10, reaching a maximum value of 1.0. The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'gaussmf', and parameters '[4 247 10]'. The 'FIS Variables' panel shows 'input1' as the current variable with a range of [0 20].
Função forma de Sino	The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a variable named 'input1'. The plot area displays a red curve representing a Sine-shaped membership function. The x-axis is labeled 'input variable "input1"' and ranges from 0 to 20. The y-axis represents the membership degree from 0 to 1. The curve starts at 0 at x=5, rises to 1 at x=10, and then falls back to 0 at x=15. The 'Current Membership Function' panel shows the name 'mf1', type 'gbellmf', and parameters '[5 3.278 10]'. The 'FIS Variables' panel shows 'input1' as the current variable with a range of [0 20].

Tabela: 4.1 Funções de Pertinência disponibilizadas no MATLAB (continuação)

Denominação	Representação gráfica
Função Sigmoidal	 The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a Sigmoidal function. The plot area displays a red sigmoidal curve on a yellow background, with the x-axis labeled 'input variable "input1"' ranging from 0 to 20 and the y-axis from 0 to 1. The plot points are set to 181. The 'Current Variable' section shows 'Name: input1', 'Type: input', 'Range: [0 20]', and 'Display Range: [0 20]'. The 'Current Membership Function' section shows 'Name: mf1', 'Type: msigmf', and 'Params: [1 543 5]'. A status bar at the bottom indicates 'Changing MF 1 type to "msigmf"'. Buttons for 'Help' and 'Close' are present.
Função diferença de duas Sigmoidais	 The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a difference of two Sigmoidal function. The plot area displays a red bell-shaped curve on a yellow background, with the x-axis labeled 'input variable "input1"' ranging from 0 to 20 and the y-axis from 0 to 1. The plot points are set to 181. The 'Current Variable' section shows 'Name: input1', 'Type: input', 'Range: [0 20]', and 'Display Range: [0 20]'. The 'Current Membership Function' section shows 'Name: mf1', 'Type: dsigmf', and 'Params: [0.5493 5 0.5493 15]'. A status bar at the bottom indicates 'Ready'. Buttons for 'Help' and 'Close' are present.
Função combinação de duas Gaussianas	 The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a combination of two Gaussian function. The plot area displays a red bell-shaped curve on a yellow background, with the x-axis labeled 'input variable "input1"' ranging from 0 to 20 and the y-axis from 0 to 1. The plot points are set to 181. The 'Current Variable' section shows 'Name: input1', 'Type: input', 'Range: [0 20]', and 'Display Range: [0 20]'. The 'Current Membership Function' section shows 'Name: mf1', 'Type: gauss2mf', and 'Params: [3.397 9 3.397 11]'. A status bar at the bottom indicates 'Ready'. Buttons for 'Help' and 'Close' are present.
Função produto de duas Sigmoidais	 The screenshot shows the MATLAB Membership Function Editor for a product of two Sigmoidal function. The plot area displays a red bell-shaped curve on a yellow background, with the x-axis labeled 'input variable "input1"' ranging from 0 to 1 and the y-axis from 0 to 1. The plot points are set to 181. The 'Current Variable' section shows 'Name: input1', 'Type: input', 'Range: [0 1]', and 'Display Range: [0 1]'. The 'Current Membership Function' section shows 'Name: mf1', 'Type: psigmf', and 'Params: [10.99 0.25 -10.99 0.75]'. A status bar at the bottom indicates 'Changing parameter for MF 1 to [10.99 0.25 -10.99 0.75]'. Buttons for 'Help' and 'Close' are present.

4.2.1 Função de Pertinência Triangular (trimf)

A curva triangular é uma função de “x”, e depende de três parâmetros escalares [a b c]. É caracterizada pela Equação 4.1:

$$f(x: a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a < x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b < x \leq c \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (4.1)$$

Os parâmetros “a” e “c” correspondem aos valores de X localizados nos vértices da base do triângulo, que possuem pertinência igual a zero. O parâmetro “b” é o valor de X localizado no vértice com pertinência igual a 1 (ver Figura 4.1).

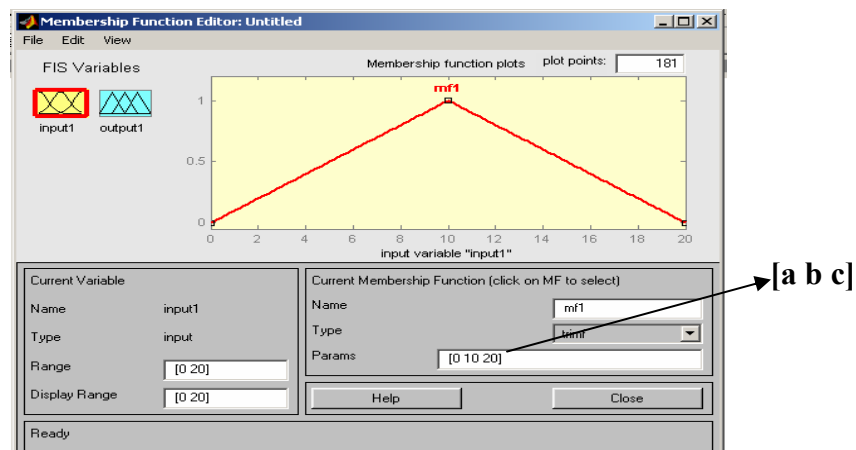


Figura 4.1: Função Triangular

4.2.2 Função de Pertinência Trapezoidal (trapmf)

A curva trapezoidal é uma função de, “x”, e depende de quatro parâmetros escalares [a b c d], como mostra a Figura 4.2. É caracterizada pela expressão mostrada na Equação 4.2:

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ 0, & x > d \\ \frac{d - x}{d - c}, & c < x \leq d \end{cases} \quad (4.2)$$

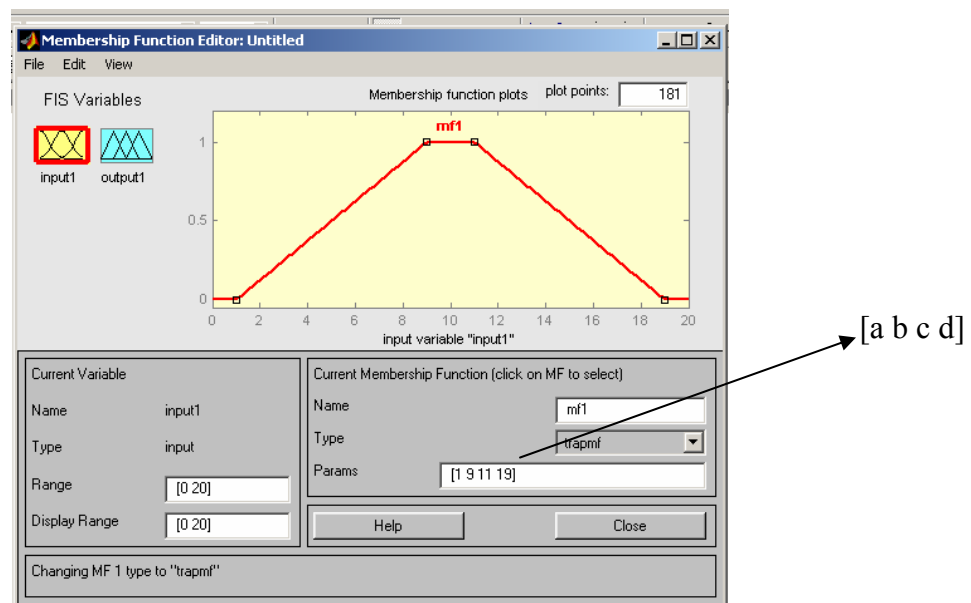


Figura 4.2: Função Trapezoidal

Os parâmetros “a” e “d” correspondem aos valores de X cuja pertinência é igual a zero, enquanto para os parâmetros “b” e “c” correspondem a valores de X com pertinência igual a 1.

4.2.3 Função de Pertinência Forma de “Z” (zmf)

Esta função de “x”, recebe este nome devido a sua forma de “Z”. Os parâmetros “a” e “b” correspondem a valores de X localizados nos extremos da parte inclinada da curva. Para $x \leq a$, $\mu(x) = 1$ e para $x \geq b$, $\mu(x) = 0$.

A expressão que a caracteriza, Equação 4.3, e o esboço de seu gráfico, Figura 4.3 são apresentados a seguir

$$f(x) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ \left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & x > b \end{cases} \quad (4.3)$$

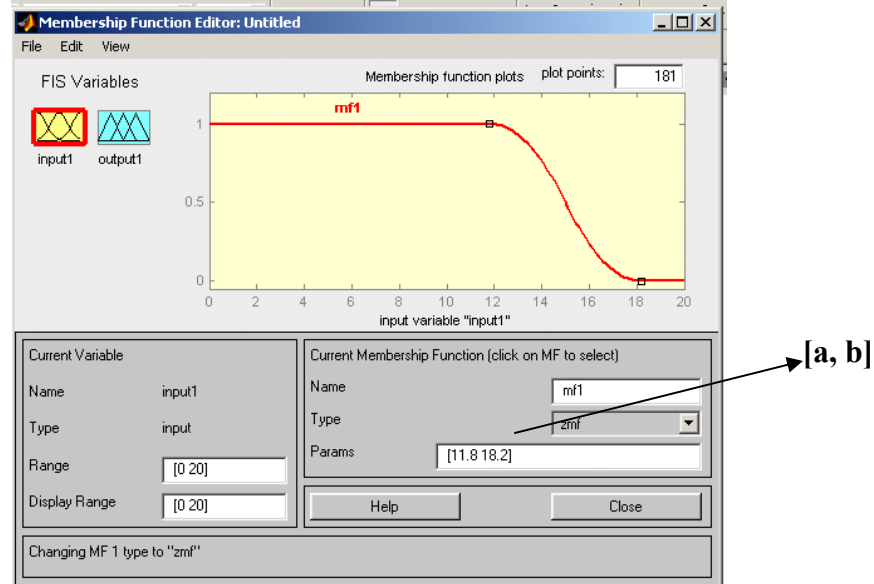


Figura 4.3: Função Forma de Z

4.2.4 Função de Pertinência Forma de “S” (smf)

Esta curva recebe este nome devido à semelhança que seu gráfico tem com a letra “S”. Os parâmetros “a” e “b” estão localizados nos extremos da porção inclinada da curva. No sistema de ajuda do MATLAB a expressão dessa função não é apresentada. Ela foi adaptada de Zadeh (1973).

O parâmetro “a” é o maior valor do universo de discurso que possui pertinência zero, e “b” é o menor valor do universo de discurso que possui pertinência 1. Isto é: para $x \leq a$, $\mu(x) = 0$ e para $x \geq b$, $\mu(x) = 1$. Essa função é apresentada na Equação 4.4 e Figura 4.4.

$$f(x) = \begin{cases} 0, & x < a \\ 2x^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2(1-x)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & x \geq b \end{cases} \quad (4.4)$$

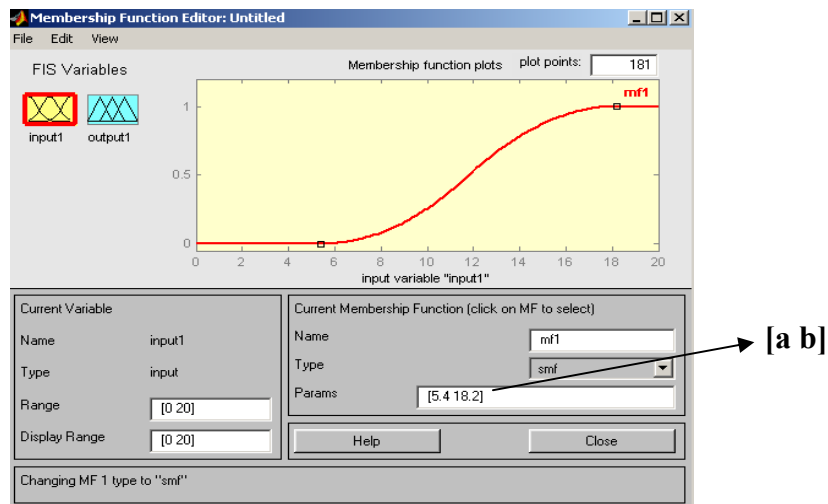


Figura 4.4: Função Forma de S

4.2.5 Função de Pertinência Forma de “ π ” (pimf)

Esta função de pertinência é estimada nos pontos “x” pertencentes ao universo de discurso X. Os parâmetros “a” e “d” estão localizados na base da curva enquanto “b” e “c” estão localizados na parte do domínio com pertinência igual a 1. Para $x \leq a$, $\mu(x) = 0$ e para $b \leq x \leq c$, $\mu(x) = 1$; para $x \geq d$, $\mu(x) = 0$.

Zadeh (1973), definiu a expressão da função π como sendo a expressão de duas funções forma de S acopladas, onde os pontos com parâmetros “b” e “c” coincidem, ou seja, no trabalho de Zadeh (1973) o gráfico da função não apresenta um intervalo de valores ($b \leq x \leq c$), no universo de discurso, com pertinência igual a 1. Contudo, deve-se ressaltar que as funções são as mesmas. A Figura 4.5, obtida no *software* MATLAB, apenas apresenta mais de um valor com pertinência igual a 1.

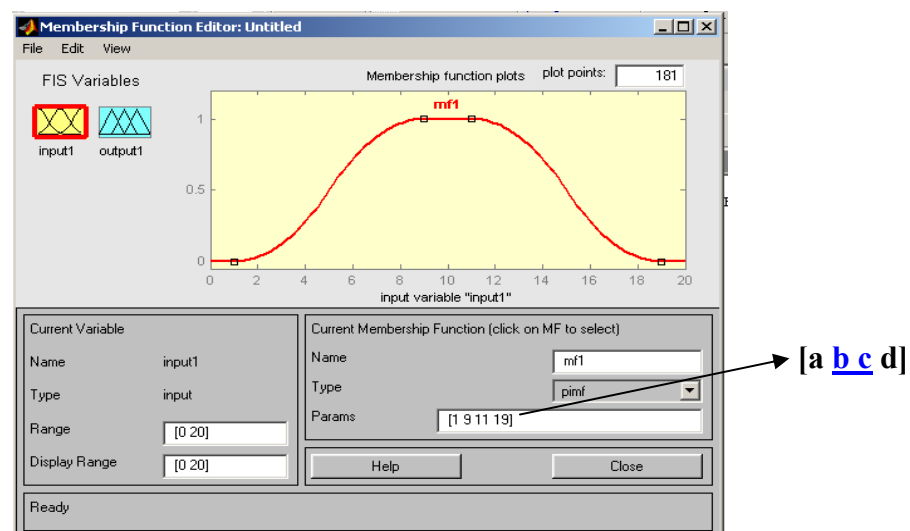


Figura 4.5: Função forma de π

4.2.6 Função de Pertinência Gaussiana. (gaussmf)

A função simétrica Gaussiana depende de dois parâmetros “ σ ” e “ c ”, caracterizada pela Equação (4.5).

$$f(x, \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.5)$$

onde: “ σ ” = desvio padrão e “ c ” = média

A Figura 4.6 mostra a forma de uma função Gaussiana.

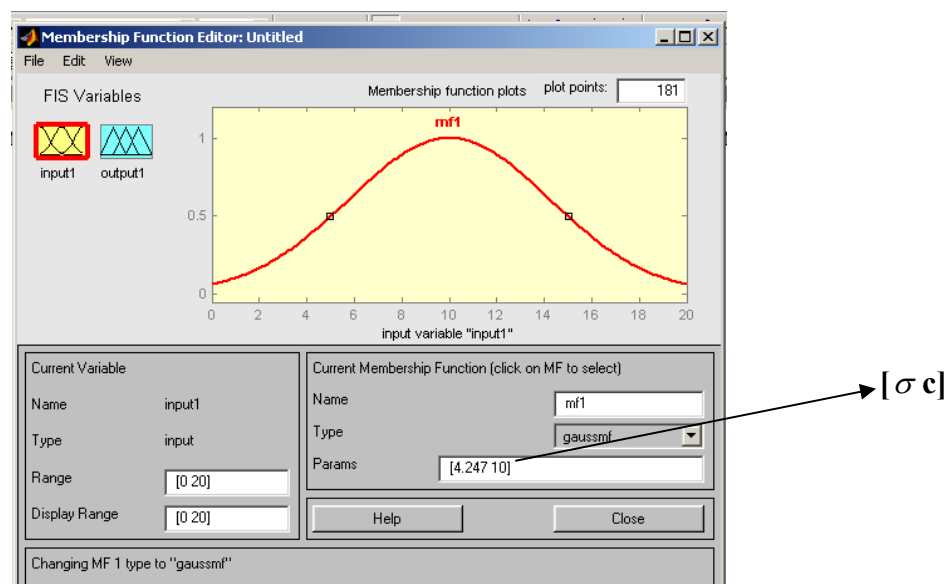


Figura 4.6: Função Gaussiana

Os parâmetros da função Gaussiana estão listados em ordem no vetor [desvio padrão, média]. A função gaussiana é base para a determinação da expressão da função combinação de duas Gaussianas.

Para facilitar futuros usos da função Gaussiana e da função Combinação de duas Gaussianas, foi considerado que a expressão da função é composta por $f(x) = e^{-ax^2}$, uma vez que o parâmetro “ c ” está presente, para determinar o quanto a função será deslocada do eixo “ y ” para a esquerda ou direita. Assim, o parâmetro “ a ” será considerado como: $\frac{1}{2\sigma^2}$.

Realizando a primeira e segunda derivada da expressão $f(x) = e^{-ax^2}$ concluímos que a função é crescente para valores menores que zero, e decrescente para valores maiores que zero. Os pontos $\{(-\sigma; \frac{1}{\sqrt{e}}) (\sigma; \frac{1}{\sqrt{e}})\}$ são os pontos onde a função muda de concavidade, sendo determinados ao realizar a segunda derivada da função $f(x) = e^{-ax^2}$ e igualando-a a zero.

Conhecendo o comportamento da função, pode-se realizar algumas considerações, a fim de se determinar a relação entre os parâmetros média e desvio padrão. Admitindo-se que sejam conhecidos a média e os valores de “x” para os quais a função de pertinência é igual a 0,5 (estes pontos são destacados na curva mostrada pelo MATLAB), as determinações dos parâmetros a serem introduzidos no MATLAB são:

$$c = \text{média} \quad \text{e} \quad \sigma = \sqrt{\frac{(A-c)^2}{1,38}} \quad \text{onde: } A \text{ é um valor de “x” que possui}$$

pertinência igual a 0,5

Dedução:

$$\text{Seja : } f(x; \sigma, c) = e^{-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}}$$

$$0,5 = e^{-\frac{(A-c)^2}{2\sigma^2}} \quad \rightarrow \quad \ln(0,5) = \frac{-(A-c)^2}{2\sigma^2} \quad \rightarrow \quad \sigma = \sqrt{\frac{(A-c)^2}{1,38}}$$

Exemplo: No caso mostrado na Figura 4.6, A é igual a 5 ou 15 e c = 10. Assim:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(5-10)^2}{1,38}} = 4,25$$

4.2.7 Função de Pertinência Forma de Sino (gbellmf)

A função Sino depende de três parâmetros “a”, “b” e “c”, e é definida pela Equação (4.6).

$$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (4.6)$$

O parâmetro “b” é usualmente positivo. O parâmetro “c” está localizado no centro da curva, que é mostrada na Figura 4.7

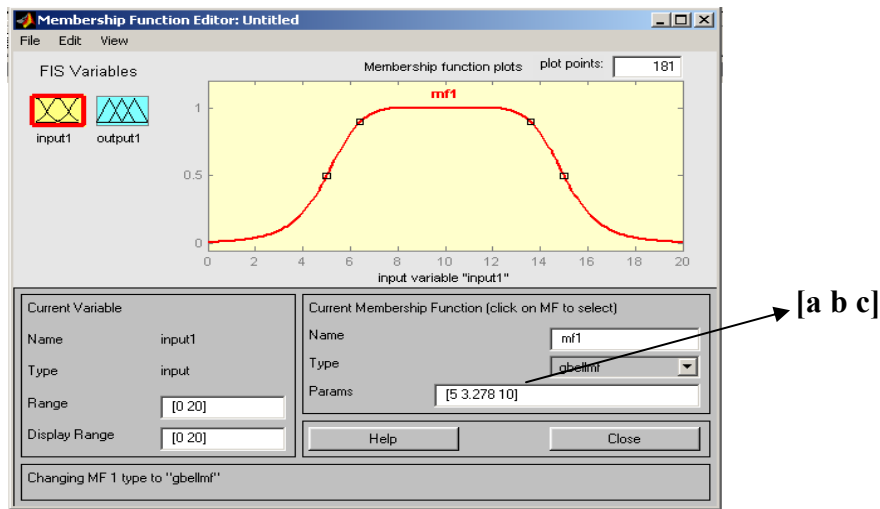


Figura 4.7: Função Forma de Sino

A curva traçada pelo MATLAB apresenta quatro pontos destacados: dois pontos para os quais a pertinência é igual a 0,5, e dois pontos para os quais a pertinência é igual a 0,9.

Chamando x_1 e x_2 os pontos onde a pertinência é 0,5, observa-se através da curva traçada que:

$$x_1 = c - a$$

$$x_2 = c + a$$

Dado que “c” é conhecido (centro da curva):

$$a = c - x_1 \quad \text{ou} \quad a = x_2 - c$$

A partir daí, conhecendo-se os valores de “x” para os quais a pertinência é 0,9, é possível determinar o valor do parâmetro “b”.

Seja x_3 e x_4 os valores de X com pertinência igual a 0,9. Então:

$$f(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}}$$

$$0,9 = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_3 - c}{a} \right|^{2b}}$$

$$b = \frac{-1,0986}{\ln \left| \frac{x_3 - c}{a} \right|} \quad \text{ou} \quad b = \frac{-1,0986}{\ln \left| \frac{x_4 - c}{a} \right|}$$

Considerando a curva mostrada na figura onde:

$$a = 5,$$

$$c = 10$$

$$\left. \begin{array}{l} x_3 = 6,4 \\ x_4 = 13,6 \end{array} \right\} \text{valores aproximados através de interpolação linear}$$

$$b = \frac{-1,0986}{\ln \left| \frac{6,4 - 10}{5} \right|} = 3,344 \quad \text{ou} \quad b = \frac{-1,0986}{\ln \left| \frac{13,6 - 10}{5} \right|} = 3,344$$

b é aproximadamente igual a 3,278 (mostrado na Figura 4.7).

4.2.8 Função de Pertinência Sigmoidal (sigmf)

A Função Sigmoidal serve de primitiva para outras duas funções: função diferença entre duas Sigmoidais e função produto de duas Sigmoidais. O software MATLAB sugere estas e outras como funções de pertinência. Contudo, ele não traz suas expressões matemáticas. Destarte, tornou-se necessário conhecer o comportamento da função sigmoidal, para assim precisar as expressões matemáticas das funções derivadas da função sigmoidal.

Esta função sigmoidal depende de dois parâmetros “a” e “c”.

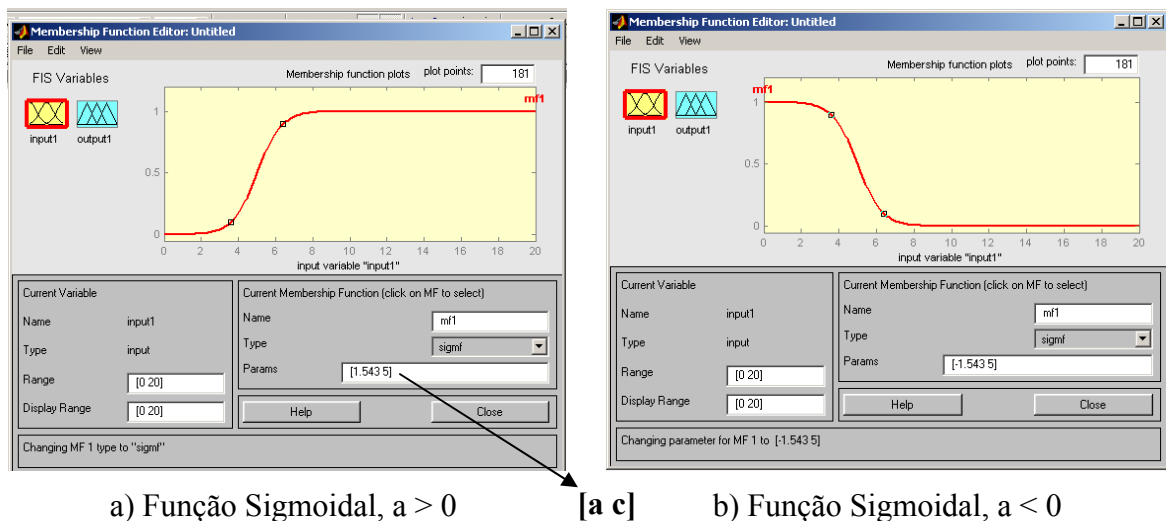
$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (4.7)$$

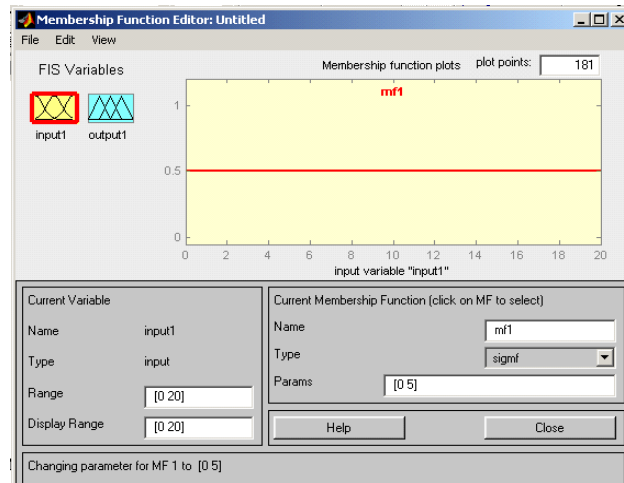
Dependendo do sinal do parâmetro “a” a função de pertinência sigmoidal é inerentemente aberta à direita ou à esquerda. Assim ela é apropriada para representar concepções como “muito grande” ou “muito negativo”.

Observando a função, constata-se que o parâmetro “c” é responsável por deslocar a curva para a direita ou esquerda do eixo das ordenadas. Portanto, para facilitar as deduções, considerou-se a seguinte expressão: $f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}}$. Isto implica que a função está interceptando o eixo das ordenadas em um valor com pertinência igual a 0,5. Realizando a primeira e segunda derivada, obtemos as seguintes expressões:

$$f'(x) = \frac{ae^{-ax}}{(1 + e^{-ax})^2} \text{ e } f''(x) = \frac{-a^2 e^{-ax}}{(1 + e^{-ax})^2} \left(\frac{1 - 2e^{-ax}}{1 + e^{-ax}} \right)$$

Analisando os resultados chega-se a conclusão que: se $a > 0$, $f(x)$ é crescente; se $a < 0$, $f(x)$ é decrescente. Desta análise conclui-se também que, quando $x = 0$, a curva muda de concavidade. Cabe ressaltar que o parâmetro “|a|” determina com que velocidade a curva tende para zero. A Figura 4.8 apresenta algumas variações da forma da Sigmoidal. Conhecendo o comportamento da função, pode-se realizar algumas considerações, a fim de se determinar a relação entre os parâmetros média e desvio-padrão.





c) Função Sigmoidal, $a = 0$

Figura 4.8: Variações quanto a forma da função Sigmoidal

A função Sigmoidal depende de dois valores; “a” e “c”, onde “c” é o valor de X para o qual a pertinência é igual a 0,5.

Demonstração:

$$0,5 = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

$$x = c$$

Conhecendo os valores de x e de c, onde x tem pertinência igual a 0,1, tem-se que:

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$$

$$0,1 = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \longrightarrow a = \frac{-2,19}{x - c}$$

Do mesmo modo, conhecendo-se o valor de “x” com pertinência igual a 0,9, tem-se que:

$$f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad 0,9 = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad a = \frac{2,19}{x - c}$$

Exemplo:

Admitindo-se uma curva onde:

$x = 2,5$; para $\mu(x) = 0,5$ tem-se $c = 2,5$

$x = 1,0$; para $\mu(x) = 0,1$ tem-se $c = 2,5$

$$a = \frac{-2,19}{1 - 2,5} = -1,46 \text{ ou } a = \frac{2,19}{1 - 2,5} = 1,46$$

$x = 4,0$; para $\mu(x) = 0,9$ tem-se $c = 2,5$

Usando-se os parâmetros: $a = 1,46$ e $c = 2,5$, no software MATLAB, obtém-se a curva:

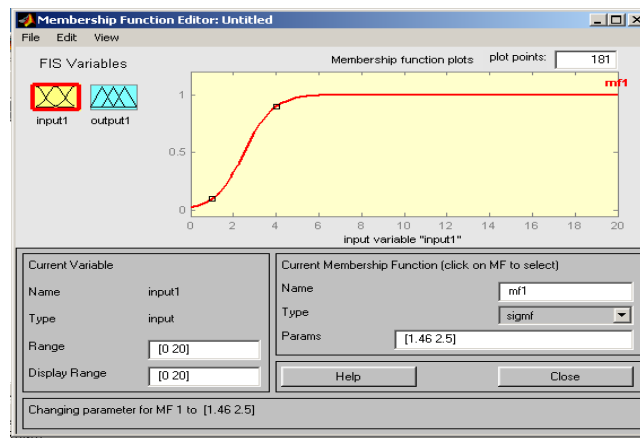


Figura 4.9: Função Sigmoidal

4.2.9 Função de Pertinência Composta pela Diferença entre duas Sigmoidais (dsigmf)

A função de pertinência *dsigmf* depende de quatro parâmetros $[a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]$, e será determinada pela diferença entre duas funções sigmoidais. Os marcadores externos c_1 e c_2 determinam os valores $f(x)$ para os quais a pertinência é igual a 0,5. A Figura 4.10 apresenta diferentes formas da função *dsigmf* em função de valores assumidos para “ a_1 ” e “ a_2 ”

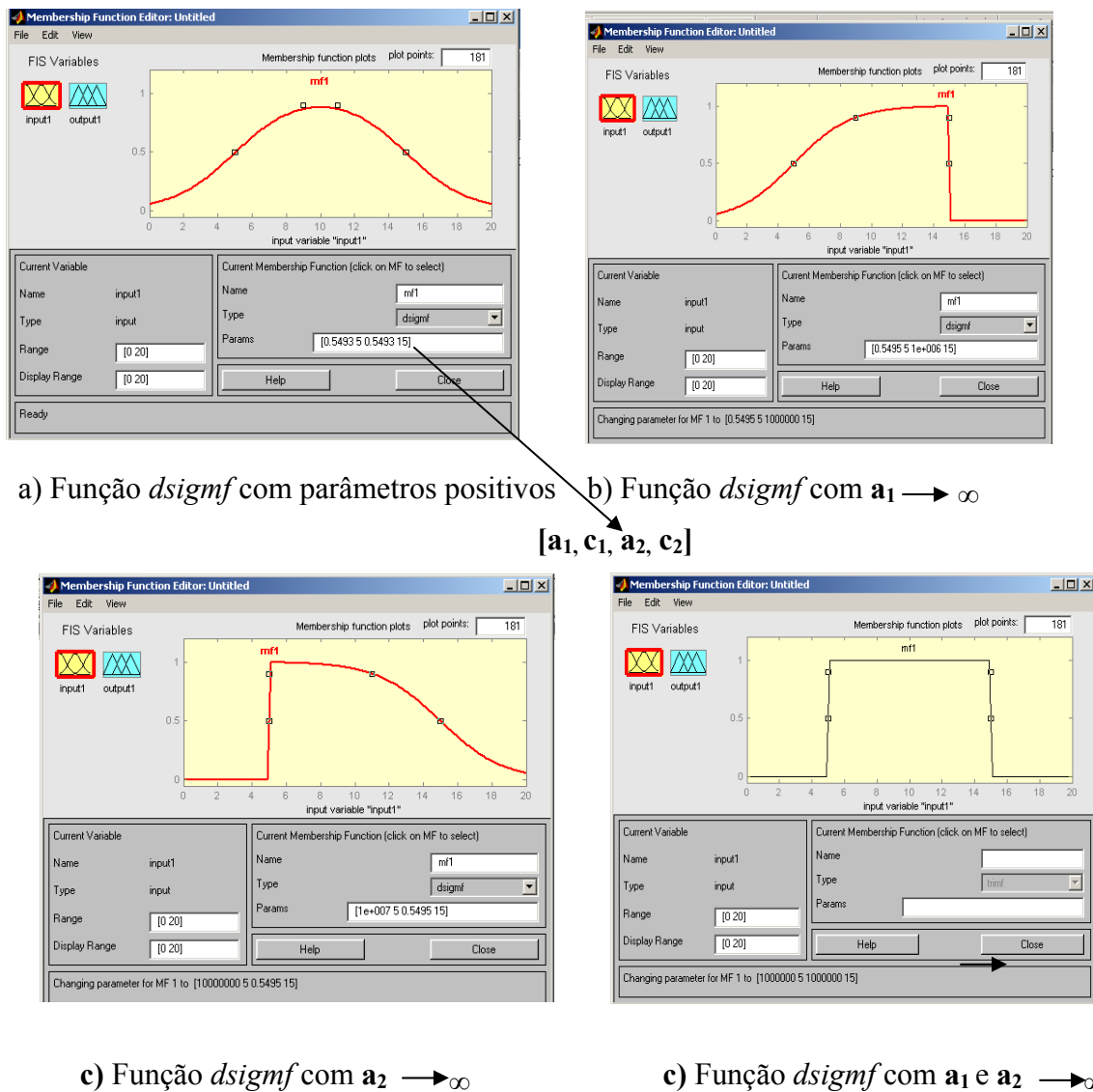


Figura 4.10: Variações do gráfico da função Diferença entre duas Sigmoidais “*dsigmf*”

A construção da função diferença de duas Sigmoidais consiste no deslocamento de duas funções sigmoidais para o ponto desejado. A expressão desta função é dada por $f(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}$. Se for adotado $c = 0$, tem-se $f(x) = 0,5$ quando $x = 0$. Para a situação, de duas funções sigmoidais, uma com $a > 0$ e a outra com $a < 0$, ambas passando por $f(0) = 0,5$, tem-se as formas mostradas na Figura 4.11

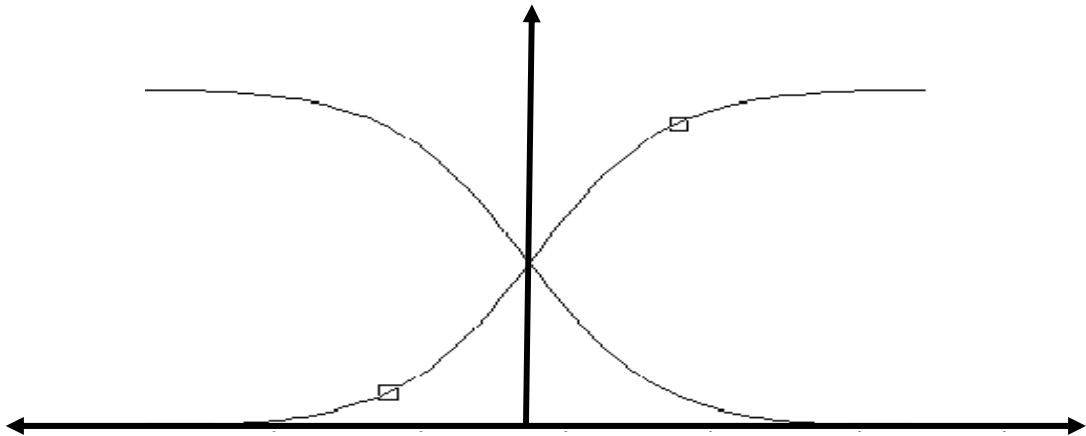


Figura 4.11: Funções Sigmoidais crescente e decrescente

Se as funções forem deslocadas, uma para direita e outra para a esquerda, em um valor “c” que tenha $f(c)$ igual a 0,5 será obtida uma função diferença de duas sigmoidais com a equação 4.8.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{1 + e^{-a(x+c)}}; x \leq 0 \\ \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}}; x \geq 0 \end{cases} \quad (4.8)$$

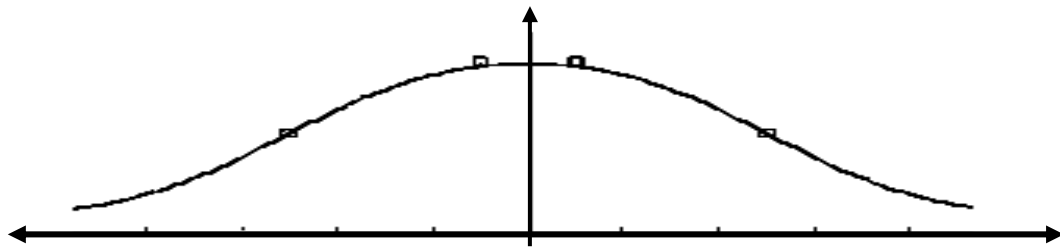
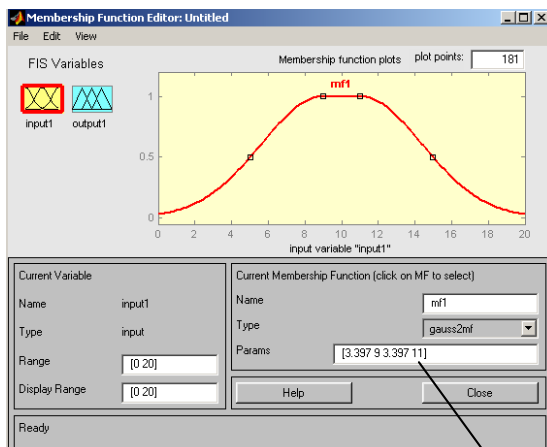


Figura 4.12: Função Diferença entre duas Sigmoidais

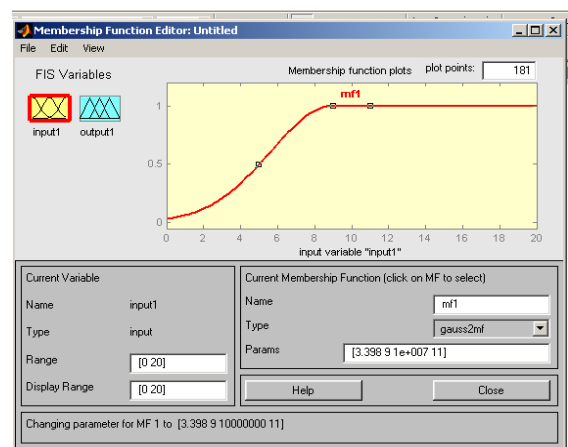
4.2.10 Função de Pertinência Combinação de duas Funções Gaussianas.

(Gauss2mf)

A função *gauss2mf* é formada pela combinação de duas gaussianas. A primeira função é especificada pelo parâmetro " σ_1 " e " c_1 ". Eles determinam a forma da curva mais à esquerda. A segunda função é especificada pelos parâmetros " σ_2 " e " c_2 " que determinam a forma da curva mais à direita [$\sigma_1 \ c_1 \ \sigma_2 \ c_2$]. Variações da forma dessa curva são mostradas na Figura 4.13.

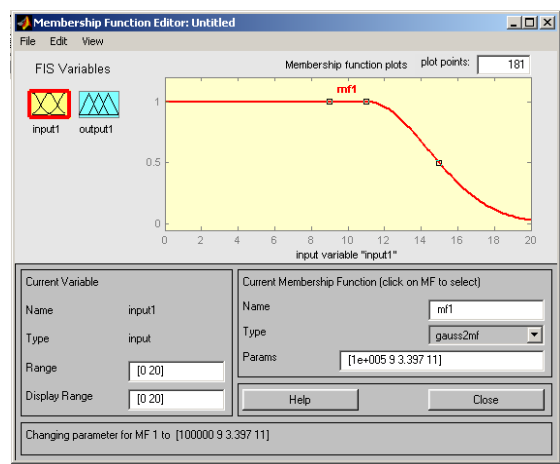
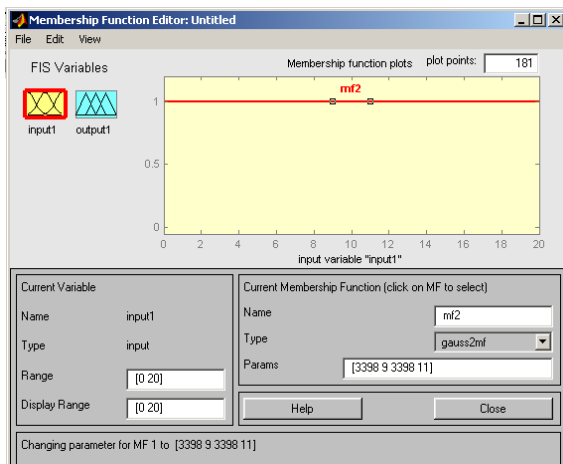


a) Função *gauss2mf* com todos os parâmetros positivos



b) Função *gauss2mf* com $\sigma_1 \rightarrow \infty$

[$\sigma_1, c_1, \sigma_2, c_2$].



c) Função *gauss2mf* com $\sigma_1 \sigma_2 \rightarrow \infty$

d) Função *gauss2mf* com $\sigma_2 \rightarrow \infty$

Figura 4.13: Variações, quanto à forma, da função combinação de duas Gaussianas

Para determinar a expressão desta combinação, partiu-se da premissa de que o ponto de máximo da função gaussiana tem coordenadas $(0, f(0))$. Esta situação está representada na Figura 4.14.

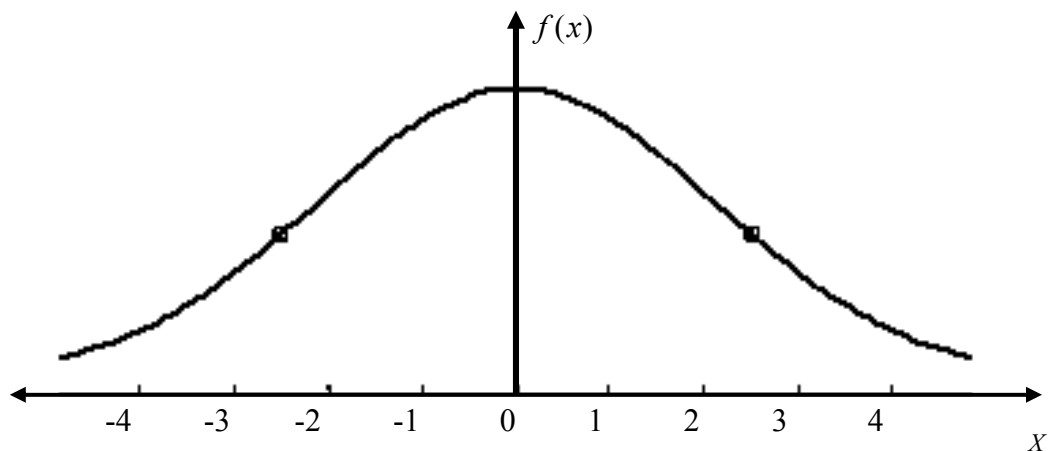


Figura 4.14: Função gaussiana com ponto de máximo em $(0, f(0))$

Se a figura for deslocada para a direita, em dois momentos distintos, obtém-se a Equação 4.8, onde, do mesmo modo que ocorre com a função Gaussiana, $f(c_1) = 1$ e $f(c_2) = 1$.

$$f(x) = \begin{cases} e^{\frac{-(x-c_1)^2}{2\sigma^2}}; & x \leq c_1 \\ 1; & c_1 \leq x \leq c_2 \\ e^{\frac{-(x-c_2)^2}{2\sigma^2}}; & x \geq c_2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Os valores de σ_1 e σ_2 são determinados pelas Equações 4.9 e 4.10 (ver dedução no item 4.2.6).

$$\sigma_1 = \sqrt{\frac{(d-c_1)^2}{1.38}} \quad (4.9)$$

$$\sigma_2 = \sqrt{\frac{(w-c_2)^2}{1.38}}, \quad (4.10)$$

de forma que, “d” e “w” são os valores de “x” onde $f(x) = 0,5$ para a curva da esquerda e da direita, respectivamente.

O gráfico desta expressão é mostrado na figura 4.13, onde é possível verificar que: $c_1 = 9$ e $f(c_1) = 1$, $c_2 = 11$ e $f(c_2) = 1$. Também pela figura, verifica-se que $d = 5$ e $w = 15$, já que nesses pontos $f(x) = 0,5$.

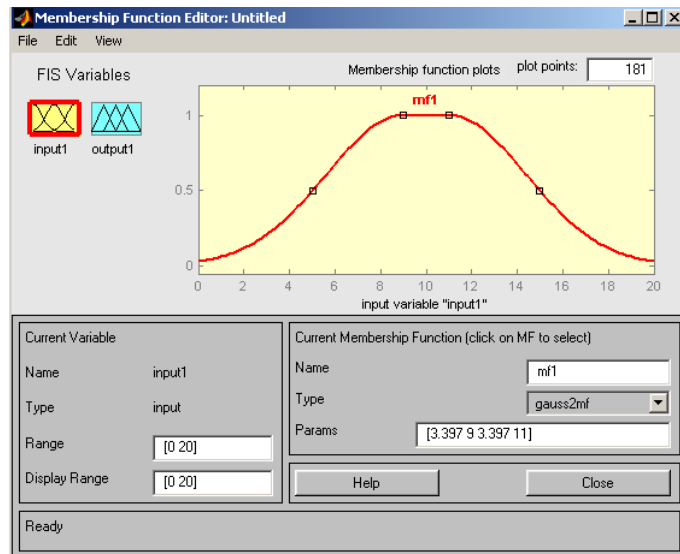
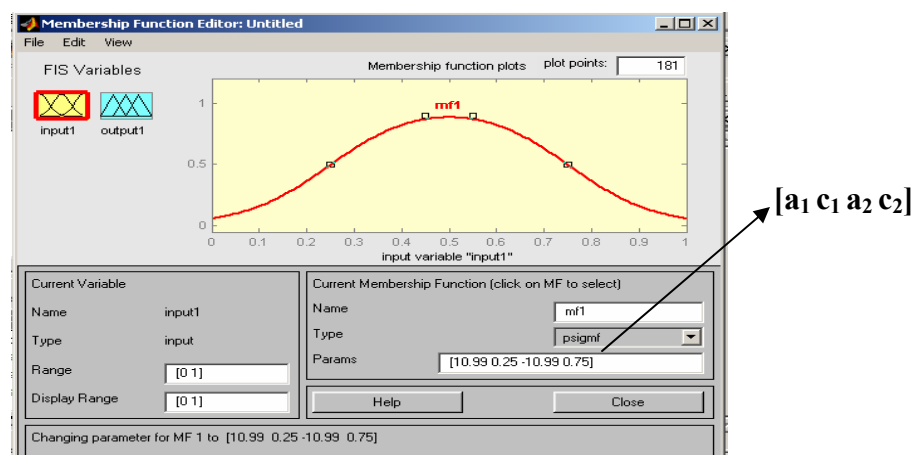


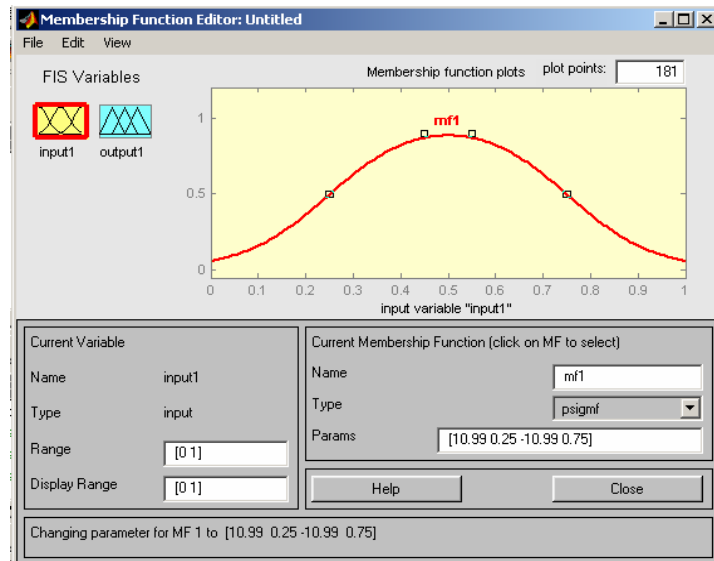
Figura 4.15: Função Combinação de duas gaussianas

4.2.11 Função Produto entre duas Funções Sigmoidais (Psigmf)

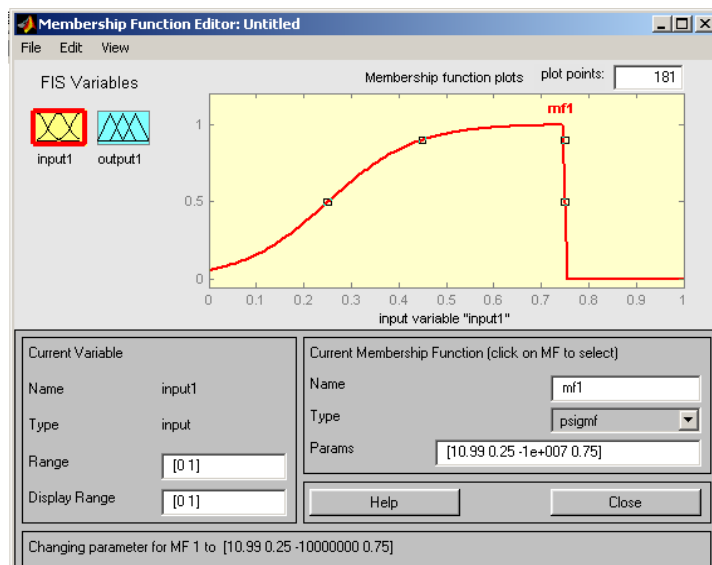
A função de pertinência *psigmf* depende de quatro parâmetros $[a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]$. Ela será determinada pelo produto de duas funções sigmoidais. Os marcadores externos c_1 e c_2 determinam os valores $f(x)$ para os quais a pertinência é igual a 0,5. Para esta função a ajuda (*help*) do MATLAB não fornece uma expressão que a defina, nem foi possível deduzir sua expressão como ocorreu com as demais funções não definidas explicitamente no material de apoio fornecido pelo software. Contudo, a Figura 4.16 mostra o gráfico da função quando ocorrem variações nos parâmetros $[a_1 \ c_1 \ a_2 \ c_2]$.



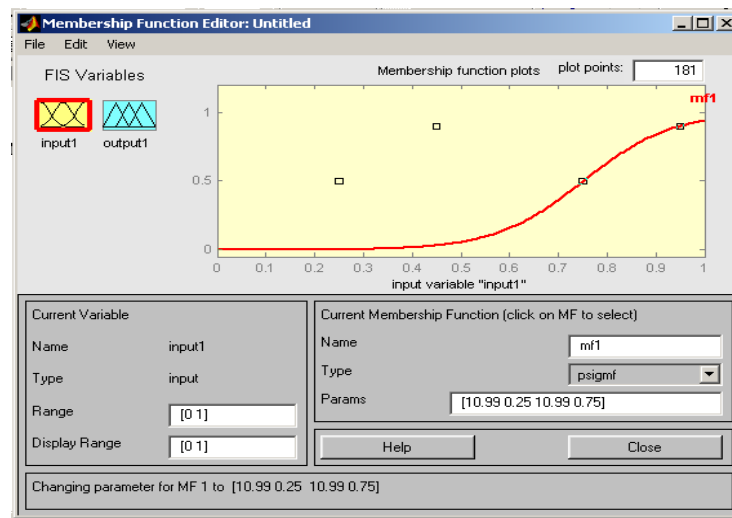
a) Função *psigmf* com todos os parâmetros positivos



b) Função *psigmf* com $a_1 \rightarrow \infty$



c) Função *psigmf* com $a_2 \rightarrow \infty$



d) Função *psigmf* com a_1 e $a_2 \rightarrow \infty$

Figura 4.16: Variações, quanto a forma, da função produto de duas Sigmoidais

4.3 RAZÕES QUE JUSTIFICAM A UTILIZAÇÃO DA FUNÇÃO TRIANGULAR EM PROCESSOS DE MODELAGEM FUZZY

As funções de pertinência triangular, segundo Pedrycz (1994), trazem algumas características inerentes que justificam sua utilização em processos de modelagem que utilizem a lógica *fuzzy*. Dentre estas características pode-se citar:

- a) simplicidade na forma da função de pertinência;
- b) informação satisfatória acerca do termo lingüístico;
- c) distribuição linear entre os termos limites do conjunto.

Além destas características, as funções triangulares utilizadas em uma modelagem *fuzzy*, desde que as partições no universo de discurso sejam uniformes, podem se sobrepor em pontos onde a imagem é dada por $f(x) = \frac{1}{2}$. Esta sobreposição garantirá que um ponto no universo de discurso terá uma completa pertinência para uma determinada categoria, e será simultaneamente excludente em relação à pertinência para todos os rótulos restantes.

Para sistemas em que a partição do universo de discurso não é homogênea, Pedrycz (1994) sugere uma metodologia que permite refazer a partição de modo a deixá-la homogênea. Para tanto, o autor utiliza o conceito e algumas propriedades de entropia aplicadas à lógica *fuzzy*.

Um argumento bastante razoável para o uso da função de pertinência triangular encontra-se na elaboração de uma interface de saída. Considerando-se que o papel desta interface é converter um resultado em um número quantificador, pode-se imaginar a elaboração deste dispositivo através de um critério que seja capaz de reconstruir a informação livre de erros, ou seja, através do resultado gerado pela interface de saída deve-se reconstruir a informação que foi obtida no sistema em questão, livre de erros.

Pedrycz (1994) mostrou que a função triangular possui essa propriedade. Para tanto, ele considerou um exemplo onde a interface de saída realiza um cálculo de média do tipo:

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \bar{x}_{A_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x)}.$$

Nesse cálculo, $\bar{x}_{A_i}$ denota o valor de “x” correspondente ao

valor máximo de $\mu_{A_i}(x)$, $\hat{x}$ denotando o valor obtido pela defuzificação de “x”, e os conjuntos A_i representando os conjuntos *fuzzy* cujos rótulos são os valores que a variável lingüística considerada pode assumir. A diferença “**e**” entre os valores de $[x - \hat{x}]$ é denominada erro na reconstrução do valor gerado pelo sistema.

O que se deseja realmente, ao se projetar esta interface de saída, é que o valor encontrado de $\hat{x}$ seja igual ao valor de “x”, fazendo com que o erro seja zero, isto é, $e = x - \hat{x} = 0$. Para verificação do critério de erro zero na reconstrução dos valores de “x” a partir do cálculo de “ $\hat{x}$ ” foram utilizados dois tipos de funções, uma triangular e uma função definida por Zadeh (1973), cujas expressões estão definidas nas Equações 4.11 e 4.12

Expressão da função definida por Zadeh:

$$f(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < -1 \\ 2(x+1)^2 & \text{se } -1 \leq x < -0,5 \\ 1-2x^2 & \text{se } -0,5 \leq x < 0,5 \\ 2(x-1)^2 & \text{se } 0,5 < x < 1 \\ 0 & \text{se } x > 1 \end{cases} \quad (4.11)$$

Expressão da função triangular:

$$f(x: a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & b \leq x \leq c \\ \frac{c-x}{c-b}, & x \geq d \\ 0, & x > c \end{cases} \quad (4.12)$$

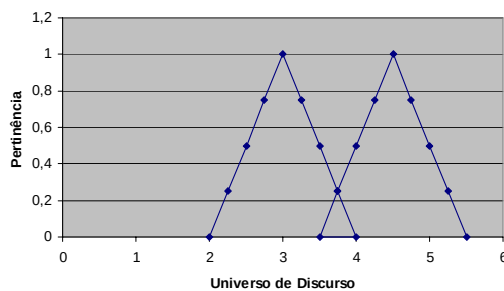
Seguindo as orientações dadas por Pedrycz (1994), para cada forma de função, foram testados três tipos de sobreposição, que tiveram como referência a pertinência igual, ou seja, duas sobreposições que tiveram suas respectivas pertinências acima e abaixo de $\frac{1}{2}$, e finalmente uma sobreposição com a pertinência $\frac{1}{2}$.

As Tabelas 4.2, 4.4, 4.6, 4.8, 4.10 e 4.12 foram elaboradas para organizar as pertinências de alguns pontos do universo de discurso. As Figuras 4.15 até 4.20 ilustram a forma das funções utilizadas e o comportamento do erro no plano cartesiano, acarretado pela defuzificação. Estas figuras têm, também, o objetivo de mostrar a localização da sobreposição dos conjuntos *fuzzy*.

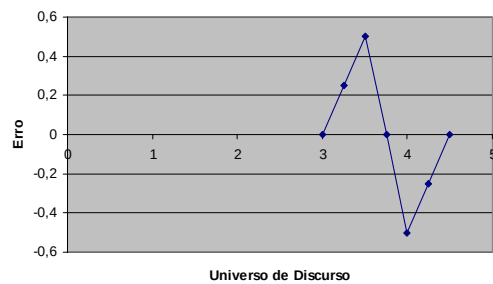
As Tabelas 4.3, 4.5, 4.7, 4.9, 4.11 e 4.13 mostram os valores da defuzificação dada por

$$\hat{x} = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x) \bar{x}_{A_i}}{\sum_{i=1}^n \mu_{A_i}(x)}, \text{ conforme procedimento apresentado por Pedrycz (1994),}$$

além do erro gerado por este processo. A expressão acima justifica o fato dos elementos do universo de discurso externos ao intervalo $\bar{x}_{A_i} < x < \bar{x}_{A_{i+1}}$ apresentarem os valores de $\hat{x}$ iguais ao valor de “x” correspondente ao valor máximo de $\mu_{A_i}(x)$. Essa região, portanto, não é considerada no processo de avaliação proposto por Pedrycz (1994).



a) Conjuntos *fuzzy*



b) Erro na defuzificação

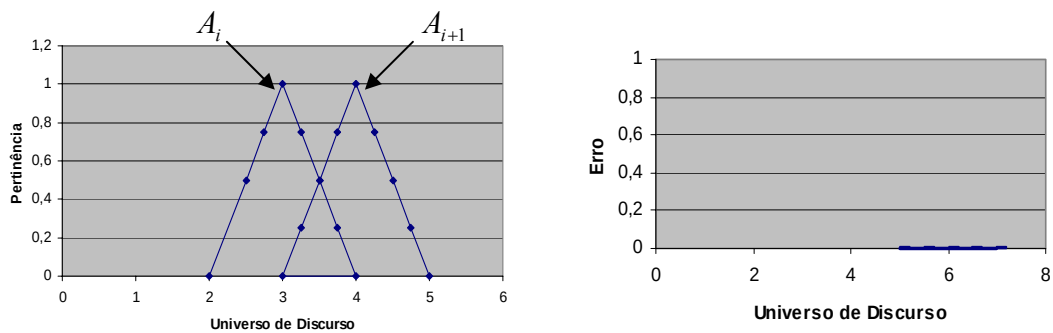
Figura 4.17: Conjuntos triangulares com sobreposição abaixo da imagem $\frac{1}{2}$ (caso 1).

Tabela 4.2: Pertinência, caso 1

x	μ_i	μ_{i+1}
3	1	0
3,25	0,75	0
3,5	0,5	0
3,75	0,25	0,25
4	0	0,5
4,25	0	0,75

Tabela 4.3: Defuzificação e o erro, caso 1

x	$\hat{x}$	erro
3	3	0
3,25	3	0,25
3,5	3	0,5
3,75	3,75	0
4	4,5	-0,5
4,25	4,5	-0,25
4,5	4,5	0



a) Conjunto *Fuzzy*

b) Erro na defuzificação

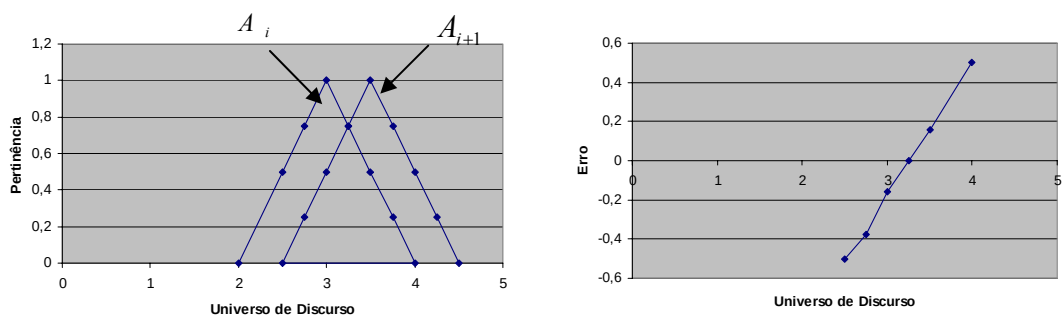
Figura 4.18: Conjuntos triangulares com sobreposição na imagem igual a $\frac{1}{2}$ (a), (caso 2)

Tabela 4.4: Pertinência, caso 2

x	μ_i	μ_{i+1}
2	0	0
2,5	0,5	0
3	1	0
3,25	0,75	0,25
3,5	0,5	0,5
3,75	0,25	0,75
4	0	1

Tabela 4.5: Defuzificação e o erro, caso 2

x	$\hat{x}$	erro
3	3	0
3,25	3,25	0
3,5	3,5	0
3,75	3,75	0
4	4	0



a) Conjuntos fuzzy

b) Erro na defuzificação

Figura 4.19: Conjuntos triangulares com sobreposição acima da imagem $\frac{1}{2}$

(caso 3)

Tabela 4.6: Pertinência, caso 3

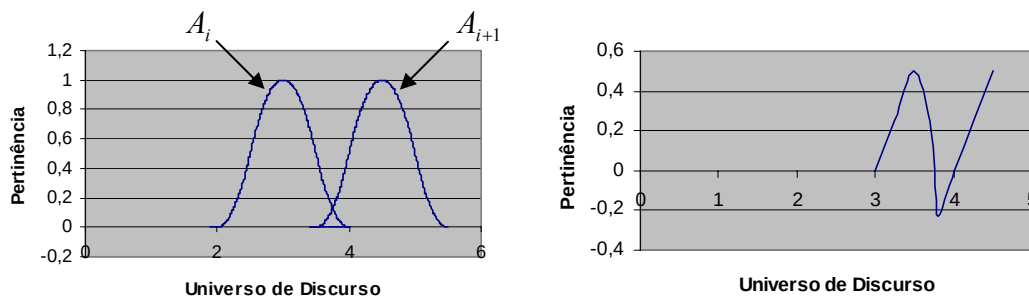
x	μ_i	μ_{i+1}
2,5	0,5	0
2,75	0,75	0,25
3	1	0,5
3,25	0,75	0,75
3,5	0,5	1
4	0	0,5
4,5	0	0

Tabela 4.7: Defuzificação e o erro, caso 3

x	$\hat{x}$	erro
2,5	3	-0,5
2,75	3,125	-0,375
3	3,16	-0,16
3,25	3,5	0
3,5	3,33	0,16
4	3,5	0,5

Assim, observa-se que a utilização de conjuntos *fuzzy* com função de pertinência triangular, que se sobrepõem no ponto onde $\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{2}$ implica na ausência de erro na defuzificação.

A seguir é apresentada uma análise análoga à realizada para a função triangular para o caso de um dos tipos de função de pertinência definidos por Zadeh (1973).



a) Conjuntos *fuzzy*

b) Erro na defuzificação

Figura 4.20: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição abaixo da

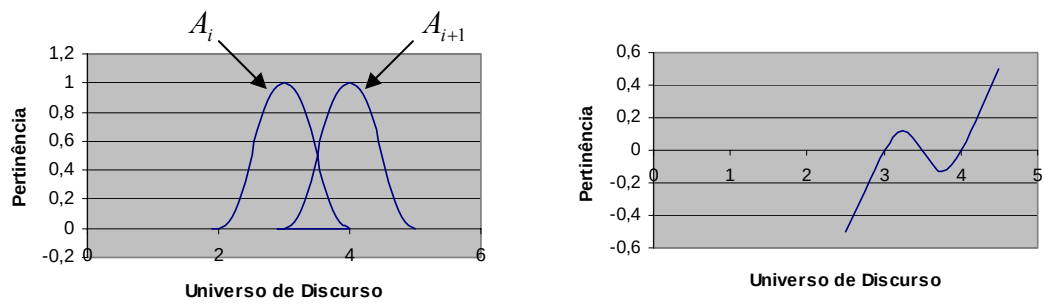
imagem $\frac{1}{2}$ (caso 4)

Tabela 4.8: Pertinência, caso 4

x	μ_i	μ_{i+1}
3	1	0
3,25	0,875	0
3,5	0,5	0
3,7	0,18	0,08
3,75	0,125	0,125
3,8	0,08	0,18
4	0	0,5
4,25	0	0,875
4,5	0	1

Tabela 4.9: Defuzificação e o erro, caso 4

x	$\hat{x}$	<i>erro</i>
3	3	0
3,25	3	0,25
3,5	3	0,5
3,7	3,46	0,24
3,75	3,75	0
3,8	4,03	-0,23
4	4	0
4,25	4	0,25
4,5	4	0,5



a) Conjuntos *fuzzy*

b) Erro na defuzificação

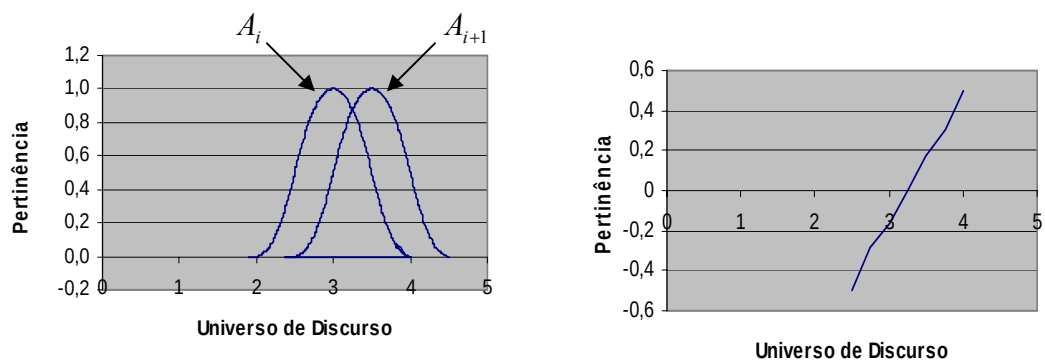
Figura 4.21: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição na imagem $\frac{1}{2}$
(caso 5)

Tabela 4.10: Pertinência, caso 5

x	μ_i	μ_{i+1}
2,5	0,5	0
2,75	0,875	0
3	1	0
3,25	0,875	0,125
3,5	0,5	0,5
3,75	0,125	0,875
4	0	1
4,25	0	0,875
4,5	0	0,5

Tabela 4.11: Defuzificados e o erro, caso 5

x	$\hat{x}$	<i>erro</i>
2,5	3	-0,5
2,75	3	-0,25
3	3	0
3,25	3,125	0,125
3,5	3,5	0
3,75	3,875	-0,125
4	4	0
4,25	4	0,25
4,5	4	0,5



a) Conjuntos *fuzzy*

b) Erro na defuzificação

Figura 4.22: Conjuntos definidos por Zadeh (1973) com sobreposição acima da

imagem $\frac{1}{2}$ (caso 6)

Tabela 4.12: Pertinência caso 6

x	μ_i	μ_{i+1}
2,5	0,5	0
2,75	0,875	0,125
3	1	0,5
3,25	0,875	0,875
3,5	0,5	1
3,75	0,125	0,875
4	0	0,5

Tabela 4.13: Defuzificação e o erro, caso 6

x	$\hat{x}$	erro
2,5	3	-0,5
2,75	3,03	-0,28
3	3,16	-0,16
3,25	3,25	0
3,5	3,33	0,17
3,75	3,44	0,31
4	3,5	0,5

Como pode ser observado, nos resultados anteriores, a função proposta por Zadeh, em todos os tipos de sobreposição considerados, apresenta erros na reconstrução ponderados por Pedrycz (1994). Assim, fica claro que o autor não considerava imprescindível a condição de erro “zero”, a qual efetivamente só ocorre para funções triangulares com sobreposição no ponto com imagem $f(x) = \frac{1}{2}$. Mesmo Pedrycz (1994), apesar de identificar os problemas de erros na reconstrução, reconhece a possibilidade de serem empregados diferentes tipos de funções de pertinência.

4.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS DO CAPÍTULO

Apesar das características positivas da função triangular, ela se constitui uma entre outras possibilidades de gerar interfaces que produzam valores ótimos (Pedrycz, 1994). Assim, a realização da análise do impacto da forma das funções de pertinência sobre a resposta de um controlador *fuzzy* e, conseqüentemente, sobre o sistema que este se propõe a controlar, é importante.

Para executar a comparação entre os desempenhos dos controladores *fuzzy* tradicionais, que utilizam funções triangulares e trapezoidais, com os controladores que utilizam outras funções, deve-se tomar o cuidado de escolher as que caracterizem a informação de forma similar, além do cuidado de particionar o universo de forma análoga. Essa medida é justificada por estudos precedentes, relacionados a controlador semafórico *fuzzy*, que revelaram que variações em torno de 20% no tamanho das partições dos universos de discurso associados às variáveis de entrada do controlador afetam significativamente a sua resposta às solicitações do tráfego (Jacques et al., 2003). No Capítulo 5 desta dissertação é

realizada a análise do impacto da utilização de diferentes funções de pertinência sobre o desempenho de um controlador semafórico *fuzzy*.

Destaca-se, ainda, que as análises realizadas das diferentes funções de pertinência disponibilizadas no MATLAB, juntamente com a orientação correspondente para a sua implementação no programa, constituem-se em uma contribuição para futuras pesquisas sobre controladores *fuzzy* em geral.

5 ESTUDO DO IMPACTO DAS DIFERENTES FORMAS DE FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA SOBRE O CONTROLADOR SEMAFÓRICO FUZZY

O objetivo deste capítulo é realizar uma análise do impacto das diferentes formas de função de pertinência no desempenho do controlador semafórico *fuzzy* utilizando, para isso, a mesma base de regras, ou seja, as únicas mudanças efetivamente realizadas no controlador dizem respeito às formas das funções de pertinência. A avaliação do impacto acerca das alterações nas formas das funções de pertinência sobre o desempenho dos controladores semafóricos testados é realizada através de experimentos controlados, garantindo que as diferenças observadas se devam exclusivamente aos fatores modificados e testados.

Como objetivo secundário, é testado, de forma exploratória, o desempenho do controlador operando com diferentes formas de funções de pertinência, em conjunto com métodos distintos de defuzzificação. Dentre os vários métodos de defuzzificação encontrados na literatura, optou-se por averiguar os apresentados no software MATLAB, ou seja: LOM, MOM, SOM, COG e Bissetor. Para alcançar este objetivo foram alterados no controlador apenas as funções de pertinência e os métodos de defuzzificação. Assim, espera-se avaliar a resposta do controlador e o desempenho do tráfego sob as mesmas condições a não ser pelas alterações aludidas.

O controlador *fuzzy* básico utilizado neste estudo possui variáveis lingüísticas e conjunto de regras similares ao controlador desenvolvido por Niittymäki e Pursula (2000).

Para melhor sistematização este estudo, o capítulo está organizado em seções abordando os seguintes conteúdos: caracterização da interseção considerada, caracterização do controlador *fuzzy* básico no MATLAB; definição das funções de pertinência que serão testadas nos controladores *fuzzy* e geração das planilhas de controle referentes a cada uma das alterações; e métodos de defuzzificação. Os resultados da simulação do tráfego para cada condição estudada de operação e volume, com o uso do programa HUTSIM (Kosonen, 1999), e a análise correspondente desses resultados também são apresentados nesse capítulo.

5.1 INTERSEÇÃO BÁSICA UTILIZADA NO ESTUDO

A interseção considerada tem características semelhantes à interseção utilizada no trabalho de Santos (2003), ou seja, trata-se do cruzamento de duas vias de sentido único, uma principal e uma secundária, operando com três diferentes níveis de volume de tráfego, como mostra a Tabela 5.1. Cada aproximação tem duas faixas e 510,8m de comprimento, não sendo permitidos os movimentos de conversão e ultrapassagem. O tráfego é composto única e exclusivamente por veículos de passeio. As extensões das vias foram assim adotadas para que na ocasião da simulação do volume alto, os veículos não extrapolassem os limites da via.

Tabela 5.1: Níveis de volume de tráfego

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

Fonte: Santos, (2003)

Estes volumes foram estipulados a partir da relação entre volume e capacidade das vias. Para classificar os volumes foram utilizados os seguintes intervalos:

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

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY BÁSICO NO MATLAB

Este controlador *fuzzy* é caracterizado a partir dos seguintes elementos: variáveis lingüísticas, tipo das funções de pertinência utilizadas para a caracterização dos conjuntos *fuzzy*, base de regras utilizadas para a operação do controlador e o método de defuzzificação adotado.

Foram adotados dois tipos de variáveis: as de entrada e as de saída. As variáveis de entrada são: número de veículos na fila que está recebendo a indicação vermelha (fila); e número de veículos na aproximação que está recebendo o tempo de verde (chegada). A variável de saída é a extensão de tempo de verde dada pelo controlador (extensão).

Foram definidos conjuntos *fuzzy* relacionados aos valores possíveis de cada variável. Esta definição foi baseada em estudo realizado por Jacques *et al.* (2002b). As variáveis com seus respectivos conjuntos estão listadas abaixo:

- a) Fila: pequena, média, longa e qualquer;
- b) Chegada: zero, pouca, média, muita e qualquer;
- c) Extensão: zero, curta, média e longa.

A Tabela 5.2 apresenta os intervalos em que estão definidos os conjuntos *fuzzy* de cada variável do controlador básico utilizado para este estudo.

Tabela 5.2: Intervalos de variação dos conjuntos *fuzzy*

Variáveis	Conjuntos <i>fuzzy</i>				
	Zero	Pouca/Pequena/Curta	Média	Muita/Longa	Qualquer
Fila	_____	0 a 10	5 a 15	10 a 20	0 a 20
Chegada	0 a 5	0 a 10	5 a 15	10 a 20	0 a 20
Extensão	0 a 5	0 a 10	5 a 15	10 a 20	_____

Estas funções, no controlador básico, têm as seguintes formas:

- a) Variável Fila $\left\{ \begin{array}{l} \text{Triangular: "pequena" e "média"} \\ \text{Trapezoidal: "longa" e "qualquer"} \end{array} \right.$
- b) Variável Chegada $\left\{ \begin{array}{l} \text{Triangular: "zero", "pouca" e "média"} \\ \text{Trapezoidal: "muita" e "qualquer"} \end{array} \right.$
- a) Variável Extensão $\left\{ \begin{array}{l} \text{Triangular: "zero", "curta" e "média"} \\ \text{Trapezoidal: "longa"} \end{array} \right.$

Segundo Santos (2003), o conjunto de regras *fuzzy* foi estabelecido através da experiência de especialistas, constituindo-se em regras do tipo “Se – Então”. A base de regras considerada nos controladores estudados é a apresentada na tabela 3.8 do Capítulo 3. O método de defuzificação adotado para o controlador básico foi o centro de gravidade

(COG). Os conectivos “E” e “Também” estão implementados com os operadores mínimo e máximo, respectivamente. Para função de implicação foi adotada a regra de operação mínima de Mamdani.

5.3 DEFINIÇÃO DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TESTADAS NOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Conforme já abordado no Capítulo 4, as funções adotadas para substituírem as triangulares e trapezoidais devem apresentar características semelhantes. Neste sentido, a Tabela 5.3 proporciona uma comparação entre as formas das funções utilizadas no controlador padrão e a forma das funções a serem testadas.

Tabela 5.3: Funções alternativas para substituir as triangulares e trapezoidais em um controlador semafórico *fuzzy*

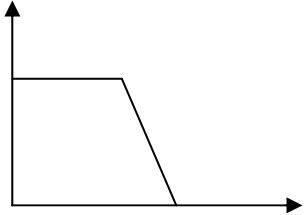
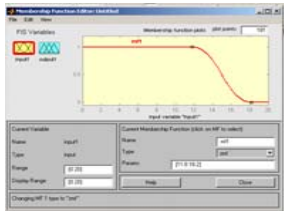
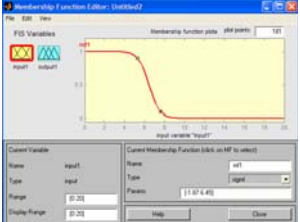
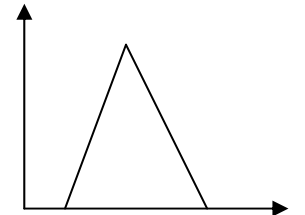
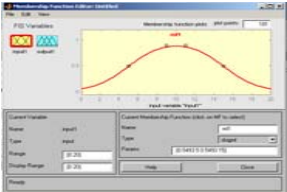
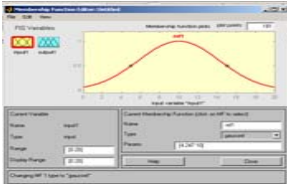
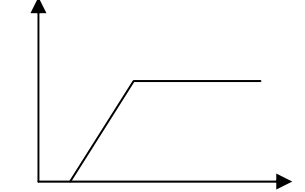
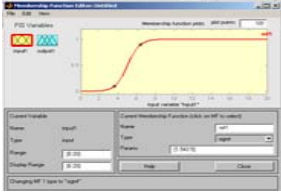
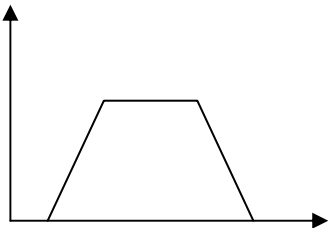
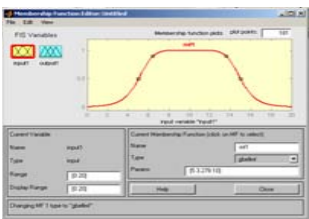
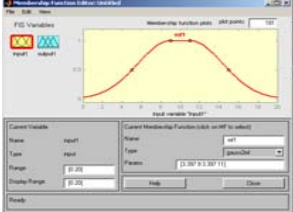
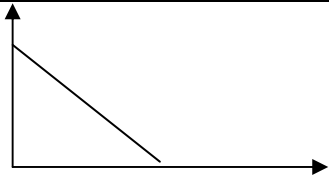
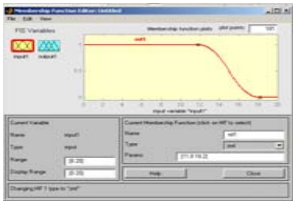
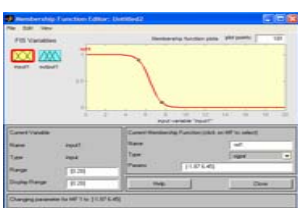
ESBOÇO DAS FUNÇÕES UTILIZADAS NO CONTROLADOR PADRÃO	FUNÇÕES ALTERNATIVAS PARA SUBSTITUIR AS TRIANGULARES E TRAPEZOIDAIS	DENOMINAÇÃO DAS FUNÇÕES ALTERNATIVAS
	a)  b) 	a) Função forma de Z b) Função Sigmoidal
	a)  b) 	a) Função Diferença entre Sigmoidais b) Função Gaussiana
	a) 	a) Função Sigmoidal

Tabela 5.3: Funções alternativas para substituir as triangulares e trapezoidais em um controlador semafórico *fuzzy* (continuação)

ESBOÇO DAS FUNÇÕES UTILIZADAS NO CONTROLADOR PADRÃO	FUNÇÕES ALTERNATIVAS PARA SUBSTITUIR AS TRIANGULARES E TRAPEZOIDAIS	DENOMINAÇÃO DAS FUNÇÕES ALTERNATIVAS
	a)  b) 	a) Função forma de Sino b) Função Combinação de duas Gaussianas
	a)  b) 	a) Função forma de Z b) Função simoidal

Estas funções foram combinadas de modo a obter seis controladores para serem testados. Em todos os dispositivos as características permaneceram as mesmas, com exceção das funções de pertinência. Os controladores doravante serão denominados por Caso 1, 2, 3,..., 6, conforme descrito na relação abaixo, onde são indicadas as combinações de funções de pertinência adotadas:

Caso 1: Triangular e Trapezoidal;

Caso 2: Sigmoidal e Diferença de duas Sigmoidais;

Caso 3: Sigmoidal e Sino;

Caso 4: Triangular e Trapezoidal (usadas de forma não convencional);

Caso 5: Forma de Z, Forma de S e Combinação de duas Gaussianas;

Caso 6: Forma de Z, Forma de S e Gaussiana.

Cada caso produz, efetivamente, dois controladores: um que usa o método COG de defuzzificação (Controlador 1C,..., Controlador 6C); e outro que usa o método Bissetor (Controlador 1B,..., Controlador 6B). Esses métodos de defuzzificação são apresentados na seção 5.4, assim como a justificativa para sua adoção.

Para estes seis casos, a Tabela 5.4 mostra os valores correspondentes dos conjuntos *fuzzy* definidos para as três variáveis. São eles: pontos onde a pertinência é igual a zero e pontos onde ela é igual a um. Estes valores são os mesmos utilizados no trabalho de Santos, (2003). A Figura 5.1 ilustra as funções de pertinência associadas aos valores da variável “chegada”.

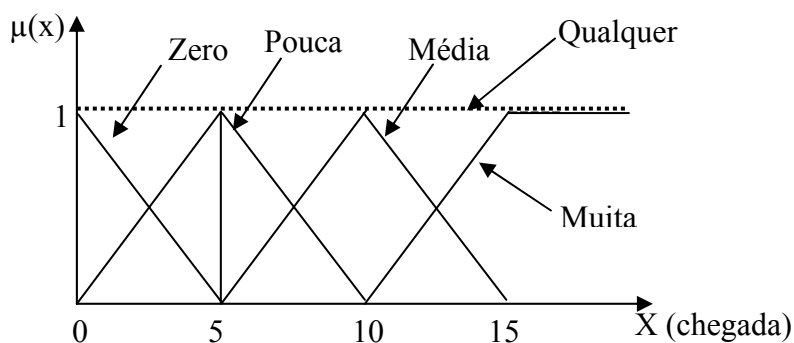


Figura 5.1: Funções de pertinência associadas aos valores da variável “chegada”

Tabela 5.4: Conjuntos *fuzzy* definidos para a variáveis fila, chegada e extensão

Variáveis	Conjuntos <i>fuzzy</i>				
	Zero	Pequena\Pouca\Curta	Médio	Longa\Muita	Qualquer
Fila		[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Chegada	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
Extensão	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	

Fonte: Adaptado de Santos (2003)

A cada alteração no controlador, relacionada às funções de pertinência, foram geradas planilhas de controle. Estas planilhas informam o tempo de verde dado de acordo com o número de veículos que chegam em uma aproximação (a que está recebendo verde) e o número de veículos que estão formando fila na outra aproximação. Além destas planilhas foram geradas superfícies de controle que são a representação gráfica destas tabelas. A Figura 5.1 e a Tabela 5.5 mostram, respectivamente, a superfície e a planilha de controle do Controlador 1C; as demais superfícies de controle se encontram no Anexo A.

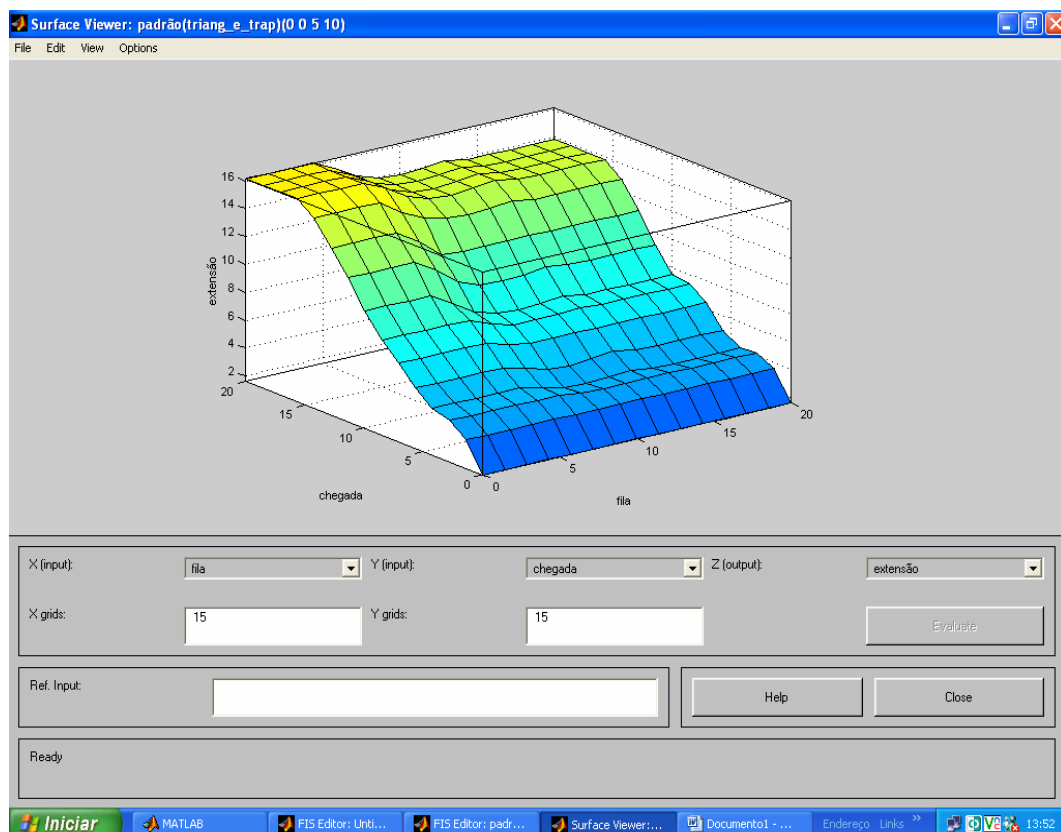


Figura 5.2: Superfície de controle – Controlador 1C

Observando a Figura 5.1, apesar dos cuidados tomados ao estabelecer as regras, constata-se suaves irregularidades na superfície. Isto se deve, segundo Santos (2003), ao processo geral do controlador ao determinar o valor das extensões. Para ilustrar, observe o número de chegadas igual a 14: à medida que o tamanho da fila cresce na aproximação conflitante, deve-se esperar que os valores da extensão diminuam. Contudo, para a mesma chegada igual a 14, nas filas com 12 e 13 veículos, a extensão deveria diminuir, entretanto ela aumenta levemente, 1 segundo. Isto pode ser apontado na Figura 5.1 e na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Planilha de controle – Extensão do tempo de verde para o controlador do Caso1C

	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
	1	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	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
	3	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	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
	5	16	32	41	46	49	50	62	71	79	88	100	114	126	137	149	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
	7	16	32	41	46	46	46	58	67	74	80	81	94	105	115	130	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
	9	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	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
	11	16	32	41	43	41	42	53	63	71	74	76	87	99	113	126	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
	13	16	32	41	43	43	44	55	63	71	76	78	89	99	113	127	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
	15	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	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
	17	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	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
	19	16	32	41	43	41	41	53	63	71	74	75	87	99	113	126	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

5.4 MÉTODOS DE DEFUZIFICAÇÃO

O principal objetivo de um método de defuzificação é transformar um conjunto *fuzzy* em uma resposta numérica. De acordo com Zadeh (1973), é razoável pensar em um elemento do conjunto *fuzzy*, com um alto grau de pertinência, de modo que ele forneça o valor numérico para a ação de controle. Entretanto, o autor reconhece que existem casos em que há mais de um conjunto *fuzzy* com valores onde a pertinência é máxima. Nestes casos, se faz necessário encontrar um critério externo para gerar esta saída numérica.

Mediante as dificuldades apontadas por Zadeh (1973), Zimmermann (1996) (*apud* Jacques *et al.* 2002b) sugere critérios para selecionar o método de defuzificação mais adequado ao modelar um controlador *fuzzy*. Esta sugestão é composta pelos quatro critérios a seguir:

- a) **Esforço Computacional:** neste critério, o método de defuzificação deve estar disponível no *software* utilizado e, quando é implementado em um algoritmo, deve ser processado em tempo compatível com o propósito da sua utilização.
- b) **Representação do objetivo:** aqui a representação do modelo deve ser capaz de capturar os objetivos de uma ação de controle *fuzzy*.
- c) **Continuidade:** por este critério, as mudanças contínuas na ação de controle, no sentido de se oporem às mudanças discretas, em alguns casos é desejável.
- d) **Plausibilidade:** a ação de controle obtida através de um método de defuzificação deve corresponder ao resultado da conclusão.

Dentre os vários métodos de defuzificação encontrados na literatura, os mais utilizados segundo Jacques *et al.* (2002b) são; Critério de Máximo (MC), Média do Método de Máximo (MOM), Maior dos Máximos (LOM), Menor dos Máximos (SOM), e o Centro de Gravidade (COG). As características gerais de cada estratégia de defuzificação são dadas abaixo:

- a) **Critério de Máximo:** este método assume que o valor de saída tem uma pertinência máxima e única. A ação de controle (Z_0) pode ser expressa como:
$$Z_0 = \{w_k | \mu_c(w_k) = \text{Max} (\mu_c(w)), \text{ para todo } w \in W, \text{ onde } C \text{ é o conjunto } \textit{fuzzy} \text{ formado como consequência de um conjunto de regras } \textit{fuzzy}, \mu_c \text{ é a função de pertinência de } C; w \text{ é o universo de discurso d ação de controle.}$$

- b) Média do Método de Máximo (MOM): esta estratégia é composta através do valor médio de todos os valores do controle de saída, cujas pertinências alcançam valores máximos.
- c) Maior dos Máximos (LOM): seleciona o maior entre os valores de saída que têm grau de pertinência máximo.
- d) Menor dos Máximos (SOM): esta estratégia faz o inverso do método LOM, ou seja, ela seleciona o menor grau de pertinência dos valores de saída.
- e) Centro de Gravidade (COG): este método gera o centro de gravidade para a distribuição de possibilidades de uma ação de controle. Formalmente esta ação é dada pela equação 5.1

$$Z_0 = \frac{\int w \mu_c(w) dw}{\int \mu_c(w) dw} \quad (5.1)$$

Para um universo de discurso discreto W, a ação de controle é determinada por meio da Equação 5.2.

$$z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_c(w_j) w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_c(w_j)}, \quad (5.2)$$

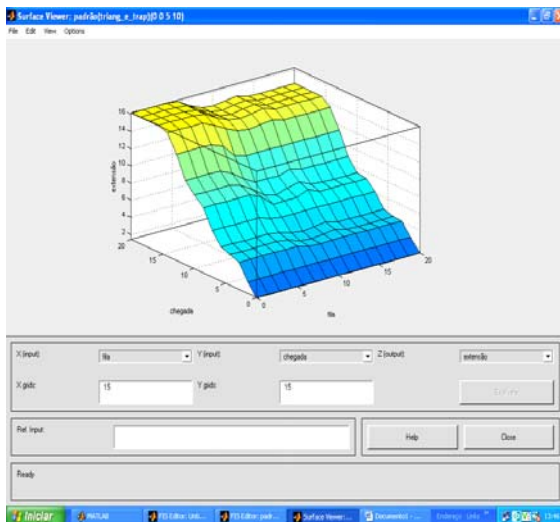
onde n é o número de elementos $w \in W$

Além dos métodos de defuzzificação anteriormente citados, o software MATLAB apresenta o método Bissetor em sua relação de métodos de defuzzificação. Este método produz como resultado da defuzzificação o valor que divide a área do conjunto C em duas regiões.

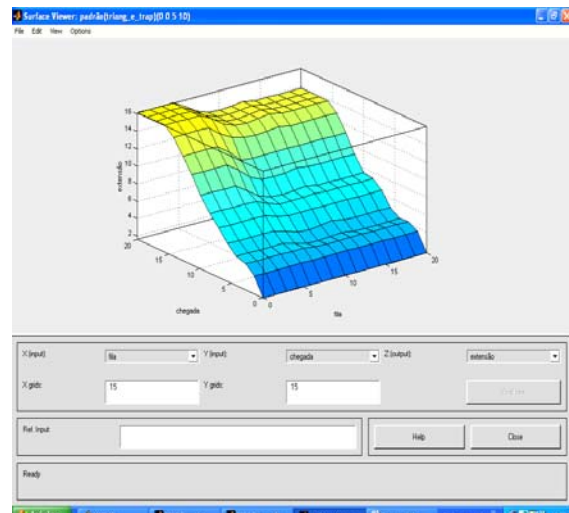
Em Jacques et al. (2002b), os autores mostram que a escolha da estratégia de defuzzificação para um controlador semafórico não deve ser realizada antes de se examinar aspectos como: interface de fuzzificação, base de conhecimentos, tipo de interseção, operação do

controlador e o volume de tráfego a ser controlado. Mediante as observações colocadas pelo trabalho citado, pretende-se realizar um estudo exploratório do desempenho de um controlador semafórico *fuzzy* através das alterações nas funções de pertinência em conjunto com modificações nos métodos de defuzificação presentes no MATLAB, ou seja, os métodos LOM, SOM, MOM, COG e o Bissetor. É necessário ressaltar que, para efeito destas comparações. Inicialmente, foi feita uma avaliação dos resultados da variável extensão, para as funções de pertinência clássicas (Caso 1, apresentado na Seção 5.1), considerando todos os métodos de defuzificação presentes no MATLAB.

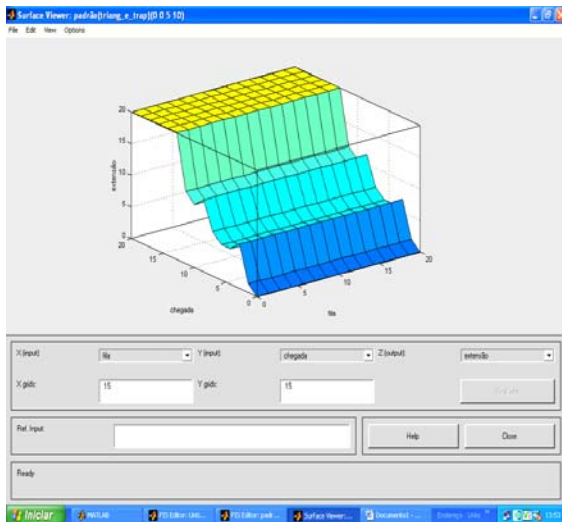
A Figura 5.3 expõe que para as estratégias LOM, SOM e MOM, as superfícies de formadas pelos valores da variável extensão (doravante referidas como superfícies de controle) mostraram-se pouco suaves. Isto quer dizer que o controlador apresentou respostas com níveis de variação muito distintos para mudanças semelhantes nos valores das variáveis “fila” e “chegada”. Assim, apenas os métodos COG e Bissetor mostraram-se adequados para a utilização em controle semafórico.



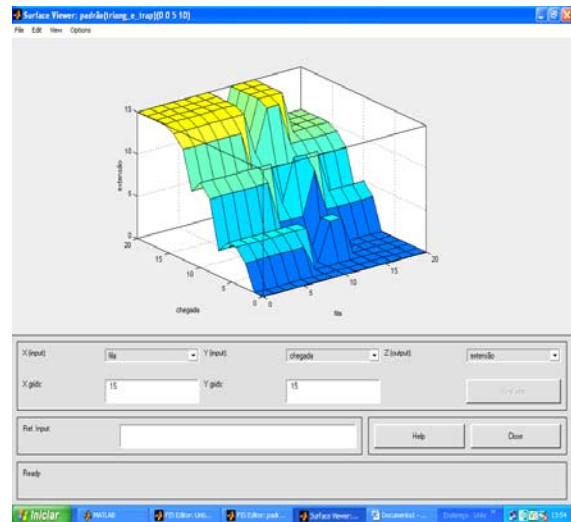
a) Método Bissetor



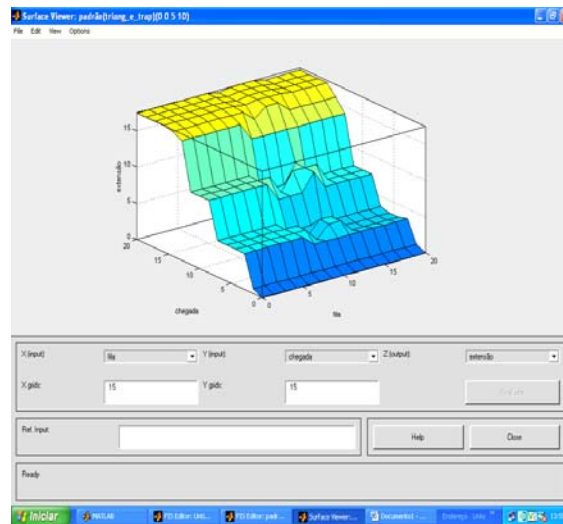
b) Método COG



c) Método LOM



d) Método SOM



a) Método MOM

Figura 5.3: Superfícies do controlador que utilizaram as funções triangular e trapezoidal

5.5 SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO PARA CADA CONDIÇÃO DE OPERAÇÃO E VOLUME

Os controladores testados são os mencionados na Seção 5.3. Cada um dos casos, associados aos métodos de defuzificação COG e Bissetor, deu origem a uma tabela de controle como a apresentada na Tabela 5.5. Estas, por sua vez, foram introduzidas no software HUTSIM (Kosonen 1999), para simular a operação do tráfego sob os três níveis de volume de tráfego citados na Tabela 5.1.

O programa HUTSIM, desenvolvido pela *Helsinki University of Technology - HUT* (Kosonen 1999), Finlândia, efetua simulação microscópica do fluxo de tráfego. Segundo Santos (2003), o programa opera com situações reais de tráfego ou faz simulações com dados fornecidos pelo usuário. Sua utilização na presente pesquisa deveu-se à capacidade do programa em executar simulações a partir das planilhas geradas pelo MATLAB.

Através do HUTSIM foram simuladas 10 horas independentes de operação do tráfego para cada um dos controladores propostos. Destas simulações foram extraídos dois tipos de resultados. O primeiro engloba medidas de desempenho da operação do tráfego e o segundo medidas associadas diretamente à resposta do controlador, ambas levando em consideração as aproximações 1 e 2 e a interseção como um todo. A aproximação 1 é definida como secundária, por ter menor volume, e a 2 como principal, por ter um volume maior. Como medidas de desempenho do tráfego foram selecionados: o atraso médio e a porcentagem de veículos parados. A resposta do controlador foi verificada através do tempo médio de verde e do tempo médio de ciclo. Para efeito de simplificação das próximas tabelas que constarão neste capítulo, as variáveis enumeradas acima serão designadas como: atraso médio na via secundária (AM01); atraso médio na via principal (AM02); atraso médio na interseção (AMI); porcentagem de veículos parados na via secundária (PP01); porcentagem de veículos parados na via principal (PP02); porcentagem de veículos parados na interseção (PPI); tempo médio de verde na via secundária (TV01); tempo médio de verde na via principal (TV02); tempo médio de verde na interseção (TVI); tempo médio de ciclo na via secundária (TC01); e tempo médio de ciclo na via principal (TC02).

Para este estudo foram realizados dois tipos de simulação, ou seja, foi verificado o comportamento do controlador a partir de dois prismas: primeiramente, os seis casos de

funções de pertinência foram testados mantendo-se fixo o método de defuzificação e alterando-se o volume para alto, médio e baixo. Posteriormente, para os mesmos casos, mudou-se o método de defuzificação para simular o comportamento de cada um mediante os três níveis de volume. Em seguida, a título de estudo exploratório, foi averiguado o desempenho do controlador alterando-se as funções, o método de defuzificação e o volume. Por último foi estudado em conjunto o efeito dos três fatores (funções de pertinência, método de defuzificação e volume) sobre a resposta do controlador e o desempenho do tráfego. Através da análise conjunta buscou-se verificar se há diferença significativa entre as variáveis quando ocorre interação entre os três fatores.

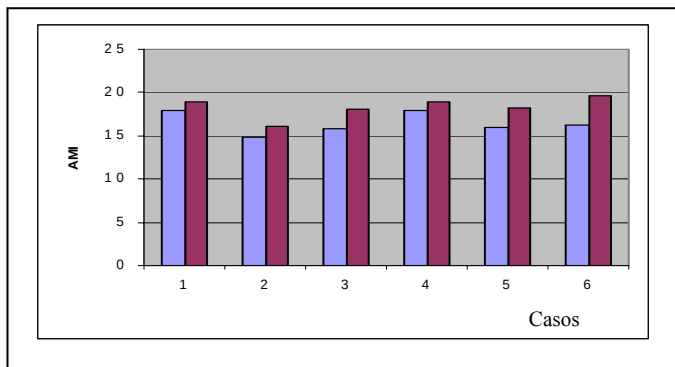
Os resultados obtidos para cada controlador, (resultado da associação entre os seis casos de funções de pertinência e os dois métodos de defuzificação) podem ser verificados nas Tabelas 5.6 a 5.11 e Figuras 5.4 a 5.6. Os resultados estão resumidos na forma de média, desvio-padrão e coeficiente de variação. As tabelas estão agrupadas pelo volume, ou seja, controladores apresentam dois tipos de defuzificação (Bissetor e o COG), sendo que para cada tipo há o resultado de desempenho segundo o fator volume. Os resultados propriamente ditos, isto é, as 10 horas com seus respectivos resultados, estão no Anexo B.

Tabela 5.6: Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume alto

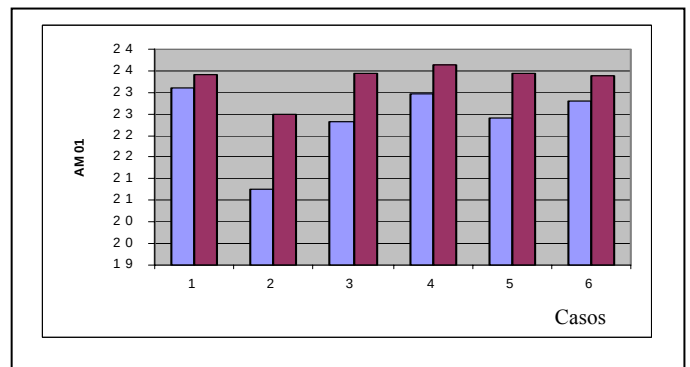
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2
Desemp do Tráfego.	A.M.	Média	17,95	23,11	15,97	14,90	20,77	12,67	15,83	22,33	13,19	17,93	22,96	16,02	15,93	22,42	13,44	16,23	22,81	13,64
		S.D.	0,52	0,99	0,59	0,40	0,52	0,47	0,48	0,78	0,52	0,58	0,79	0,73	0,37	0,66	0,43	0,35	0,90	0,25
		C.V. (%)	2,90	4,29	3,72	2,72	2,51	3,74	3,00	3,51	3,92	3,25	3,44	4,58	2,35	2,93	3,23	2,17	3,97	1,83
	P.P.	Média	50,79	63,79	45,84	45,88	65,40	38,45	47,12	66,06	39,93	50,96	63,76	46,07	47,37	66,43	40,13	47,52	65,87	40,55
		S.D.	1,31	1,95	1,64	1,27	1,60	1,56	1,25	2,05	1,91	1,39	2,00	1,81	0,81	1,88	1,40	1,13	2,04	1,60
		C.V. (%)	2,58	3,06	3,57	2,78	2,45	4,06	2,65	3,10	4,78	2,73	3,14	3,93	1,72	2,83	3,49	2,37	3,09	3,94
Desemp do Control	T.V.	Média	30,25	21,57	38,93	20,78	13,03	28,51	24,79	15,96	33,64	30,11	21,55	38,72	24,78	15,96	33,61	26,12	16,89	35,35
		S.D.	0,62	0,86	0,41	0,51	0,60	0,65	0,57	0,76	0,68	0,66	0,88	0,54	0,64	0,73	0,76	0,72	0,83	0,86
		C.V. (%)	2,04	3,98	1,06	2,46	4,61	2,29	2,30	4,78	2,03	2,18	4,09	1,40	2,58	4,58	2,26	2,76	4,94	2,43
	T.C.	Média		72,51	72,51		53,52	53,51		61,54	61,56		72,27	72,25		61,53	61,51		64,22	64,26
		S.D.		1,22	1,17		1,04	1,07		1,18	1,22		1,29	1,26		1,27	1,27		1,37	1,35
		C.V. (%)		1,69	1,62		1,95	2,00		1,92	1,98		1,78	1,75		2,06	2,06		2,14	2,10

Tabela 5.7 Controladores que utilizaram o método COG no volume alto

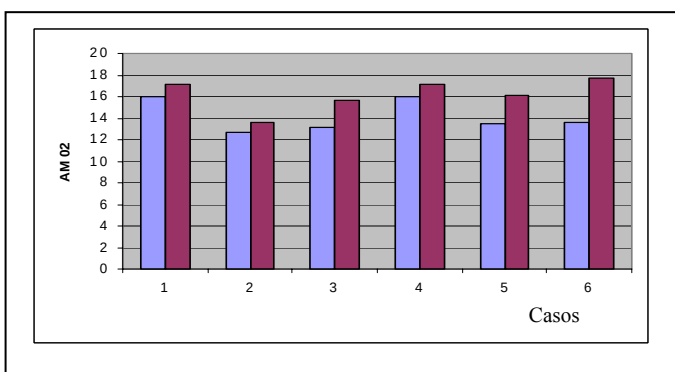
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr.1	Apr.2	Total	Apr.1	Apr.2	Total	Apr.1	Apr.2	Total	Apr.1	Apr.2	Total	Apr.1	Apr.2	Total	Apr.1	Apr.2
Desemp do Tráfego	A. M.	Média	18,86	23,40	17,16	16,04	22,50	13,56	18,04	23,44	15,62	18,89	23,64	17,11	18,16	23,44	16,15	19,60	23,39	17,76
		S.D.	0,46	0,68	0,60	0,30	0,59	0,39	0,49	1,08	0,63	0,43	0,60	0,63	0,47	1,02	0,44	0,49	0,79	0,89
		C.V. (%)	2,46	2,90	3,48	1,87	2,64	2,84	2,72	4,59	4,02	2,30	2,52	3,67	2,60	4,35	2,70	2,48	3,36	5,01
	P. P.	Média	51,89	62,59	47,82	47,78	66,90	40,53	51,21	65,11	45,92	51,99	63,25	47,73	51,25	64,56	46,16	53,50	61,84	50,32
		S.D.	1,08	2,50	1,14	0,57	1,81	0,78	1,25	2,74	1,60	0,94	1,79	1,21	1,12	2,03	1,07	0,72	1,87	0,74
		C.V. (%)	2,08	4,00	2,39	1,19	2,71	1,93	2,45	4,21	3,48	1,81	2,82	2,52	2,18	3,14	2,32	1,35	3,03	1,48
Desemp do Control	T.V.	Média	32,67	24,27	41,13	25,02	16,11	33,87	30,69	21,76	39,79	32,59	24,13	41,09	30,56	21,74	39,41	34,64	26,72	42,54
		S.D.	0,53	0,60	0,54	0,44	0,70	0,60	0,65	0,84	0,60	0,59	0,80	0,53	0,51	0,61	0,61	0,32	0,47	0,43
		C.V. (%)	1,63	2,46	1,31	1,74	4,34	1,76	2,10	3,84	1,51	1,82	3,31	1,29	1,66	2,81	1,54	0,92	1,75	1,02
	T.C.	Média		77,36	77,32		61,98	61,94		73,51	73,56		77,18	77,14		73,12	73,15		81,23	81,20
		S.D.		1,06	1,05		0,90	0,89		1,28	1,34		1,20	1,18		1,14	1,14		0,64	0,69
		C.V. (%)		1,37	1,36		1,45	1,44		1,74	1,82		1,55	1,53		1,56	1,56		0,79	0,84



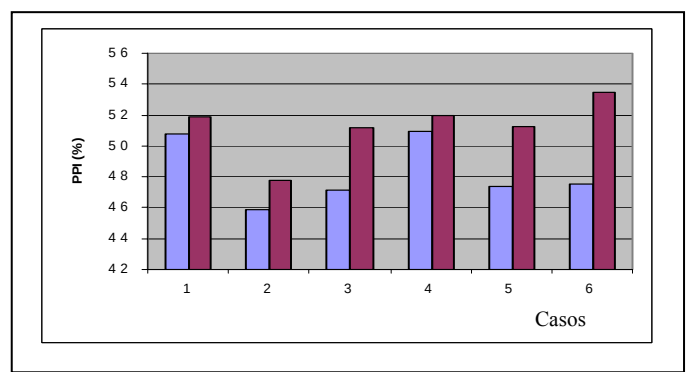
a) Atraso médio na interseção



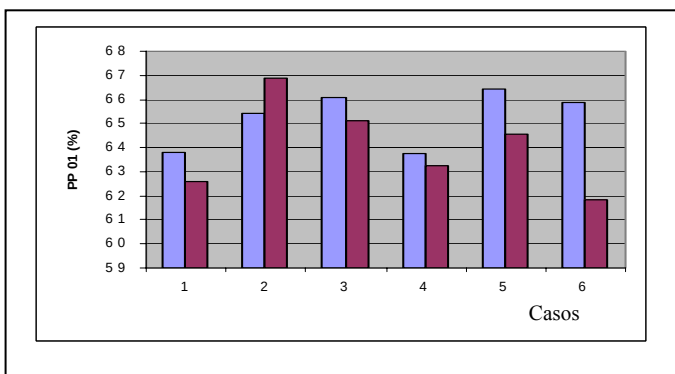
b) atraso médio na via secundária



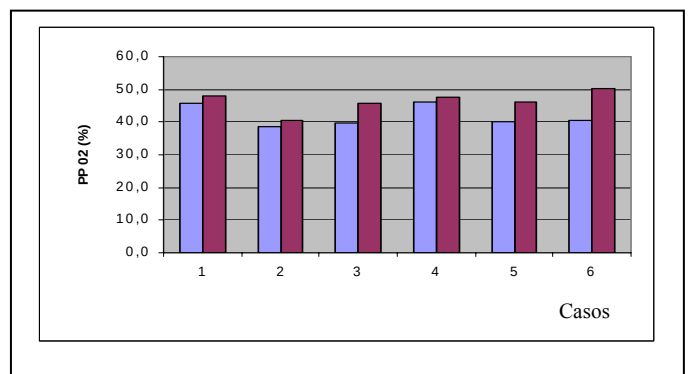
c) Atraso médio na via principal



d) % de paradas na interseção



e) % de paradas na via secundária



f) % de paradas na via principal

Controladores com Bissetor

Controladores com COG

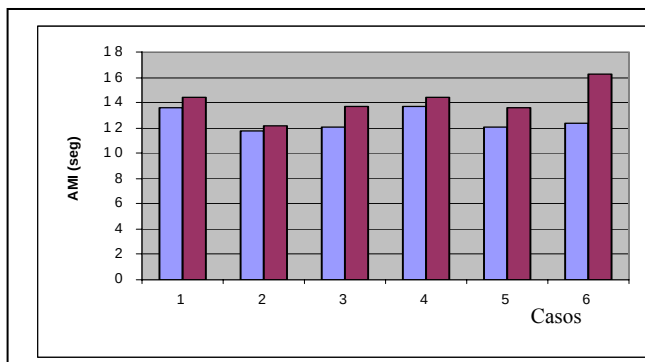
Figura 5.4: Resultado da resposta dos controladores com defuzificação Bissetor e COG: volume alto

Tabela 5.8 Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume médio

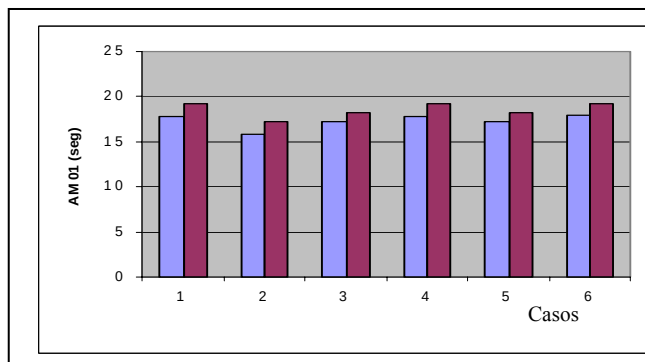
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2
Desemp do Tráfego	A.M.	Média	13,64	17,86	12,23	11,72	15,75	10,38	12,06	17,17	10,31	13,69	17,81	12,28	12,04	17,19	10,32	12,39	17,89	10,43
		S.D.	0,36	0,69	0,35	0,27	0,58	0,30	0,25	0,67	0,21	0,39	0,68	0,35	0,31	0,71	0,34	0,29	0,62	0,39
		C.V. (%)	2,61	3,88	2,83	2,28	3,68	2,88	2,07	3,92	2,06	2,84	3,84	2,89	2,58	4,13	3,29	2,35	3,46	3,71
	P.P.	Média	44,66	58,58	40,00	41,09	58,73	35,16	41,42	60,53	35,05	44,75	58,71	40,06	41,29	60,87	34,73	41,75	61,42	35,16
		S.D.	1,12	1,97	1,05	1,04	1,50	1,09	1,01	2,46	1,25	1,14	2,04	1,00	1,29	2,92	1,60	1,21	2,00	1,74
		C.V. (%)	2,51	3,36	2,63	2,54	2,56	3,10	2,43	4,06	3,56	2,55	3,48	2,50	3,13	4,79	4,60	2,89	3,25	4,96
Desemp do Control	T.V.	Média	22,21	15,44	29,02	13,44	8,70	18,20	16,50	10,28	22,68	22,20	15,46	28,99	16,45	10,36	22,56	17,25	10,76	23,70
		S.D.	0,50	0,49	0,69	0,39	0,19	0,70	0,51	0,22	0,94	0,52	0,47	0,70	0,41	0,20	0,85	0,53	0,28	1,07
		C.V. (%)	2,26	3,18	2,39	2,92	2,24	3,84	3,07	2,12	4,15	2,35	3,06	2,43	2,48	1,94	3,75	3,07	2,60	4,51
	T.C	Média		56,45	56,50		38,88	38,90		44,91	44,97		56,44	56,49		44,85	44,90		46,47	46,46
		S.D.		1,01	1,00		0,80	0,80		0,99	0,94		1,03	1,02		0,85	0,80		1,05	1,03
		C.V. (%)		1,80	1,77		2,07	2,06		2,20	2,09		1,83	1,81		1,89	1,78		2,27	2,22

Tabela 5.9: Controladores que utilizaram o método COG no volume médio

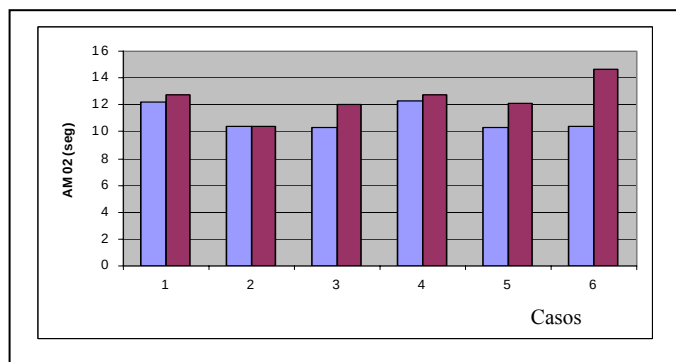
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2
Desemp do Tráfego	A.M.	Média	14,37	19,27	12,73	12,12	17,22	10,40	13,75	18,24	12,03	14,37	19,27	12,73	13,65	18,24	12,11	16,27	19,24	14,60
		S.D.	0,49	1,01	0,49	0,24	0,54	0,36	0,38	0,60	0,55	0,49	1,01	0,49	0,36	0,98	0,31	0,35	0,80	1,43
		C.V. (%)	3,44	5,24	3,88	2,01	3,11	3,44	2,76	3,28	4,54	3,44	5,24	3,88	2,65	5,38	2,57	2,13	4,13	9,78
	P.P.	Média	45,68	60,53	40,69	41,60	60,37	35,29	44,43	59,13	39,51	45,68	60,53	40,69	44,38	59,70	39,22	50,08	58,80	47,15
		S.D.	1,46	2,02	1,80	1,52	1,77	1,90	1,08	1,84	1,43	1,46	2,02	1,80	1,08	3,13	1,10	0,97	2,37	1,17
		C.V. (%)	3,19	3,34	4,43	3,66	2,93	5,40	2,43	3,12	3,63	3,19	3,34	4,43	2,44	5,25	2,81	1,94	4,04	2,48
Desemp do Control	T.V.	Média	24,06	16,7	31,4	16,5	10,4	22,61	22,5	15,47	29,49	24,06	16,73	31,44	22,4	15,44	29,32	27,99	22,7	33,33
		S.D.	0,59	0,45	0,89	0,46	0,34	0,79	0,79	0,63	1,06	0,59	0,45	0,89	0,48	0,40	0,84	0,39	0,17	0,68
		C.V. (%)	2,47	2,66	2,83	2,81	3,30	3,48	3,52	4,10	3,59	2,47	2,66	2,83	2,16	2,59	2,88	1,40	0,77	2,05
	T.C.	Média		60,14	60,16		44,93	44,96		56,97	56,99		60,14	60,16		56,75	56,80		68,02	68,01
		S.D.		1,21	1,18		1,00	0,93		1,61	1,58		1,21	1,18		0,99	0,98		0,76	0,73
		C.V. (%)		2,01	1,97		2,23	2,06		2,83	2,77		2,01	1,97		1,74	1,72		1,12	1,07



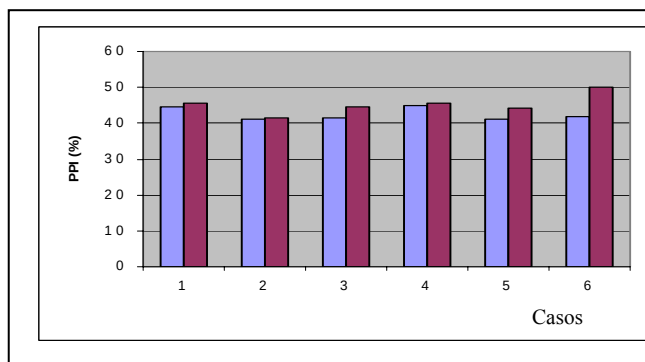
a) Atraso médio na interseção



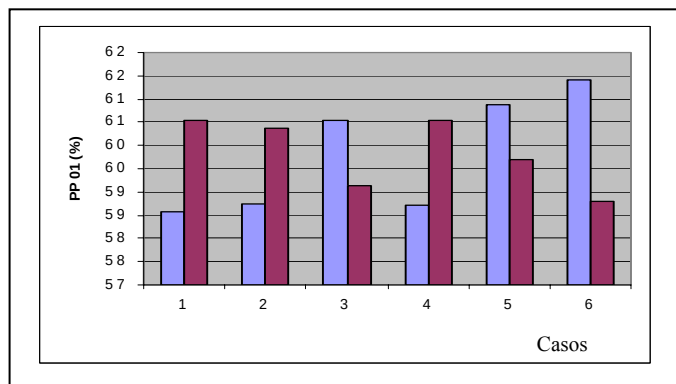
b) Atraso médio na via secundária



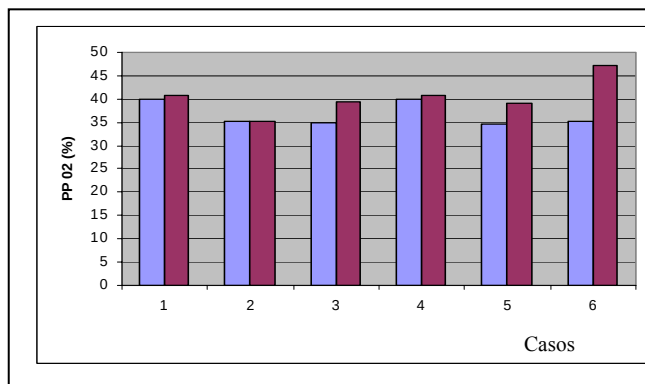
c) Atraso médio na via principal



d) % de paradas na interseção



e) % de paradas na via secundária



f) % de paradas na via principal



Controladores com Bissetor



Controladores com COG

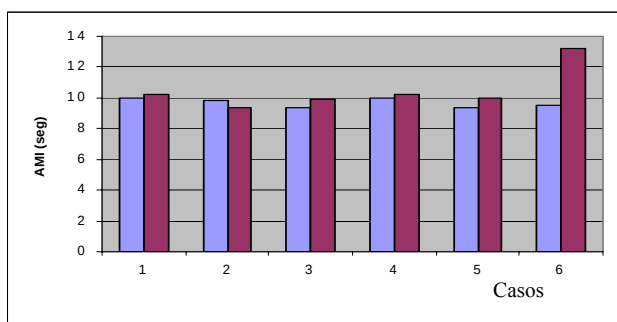
Figura 5.5: Resultado da resposta dos controladores com defuzzificação Bissetor e COG: volume médio

Tabela 5.10 Controladores que utilizaram o método Bissetor no volume baixo

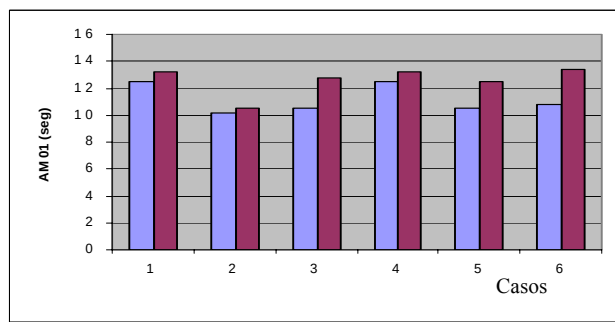
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2
Desemp do Tráfego	AM	Média	9,99	12,51	9,12	9,80	10,16	9,67	9,39	10,54	9,10	9,99	12,51	9,12	9,39	10,54	9,00	9,54	10,82	9,05
		S.D.	0,34	0,96	0,43	0,21	0,67	0,25	0,28	0,46	0,39	0,34	0,96	0,43	0,28	0,46	0,35	0,21	0,54	0,22
		C.V. (%)	3,36	7,69	4,75	2,19	6,61	2,54	2,99	4,33	4,26	3,36	7,69	4,75	2,99	4,33	3,85	2,21	4,96	2,48
	P.P.	Média	40,41	51,31	36,58	42,30	47,77	40,39	39,78	47,01	37,25	40,41	51,31	36,58	39,78	47,01	37,25	40,33	48,58	37,46
		S.D.	1,64	4,54	1,74	1,52	3,97	2,09	1,79	3,18	1,83	1,64	4,54	1,74	1,79	3,18	1,83	1,30	2,49	1,58
		C.V. (%)	4,05	8,84	4,77	3,59	8,31	5,17	4,49	6,77	4,92	4,05	8,84	4,77	4,49	6,77	4,92	3,23	5,13	4,22
Desemp do Control.	T.V.	Média	13,23	10,05	16,41	8,28	7,52	9,05	9,29	7,79	10,84	13,23	10,05	16,41	9,29	7,79	10,84	9,63	7,93	11,31
		S.D.	0,47	0,40	0,66	0,09	0,04	0,15	0,09	0,07	0,16	0,47	0,40	0,66	0,09	0,07	0,16	0,26	0,12	0,46
		C.V. (%)	3,53	3,96	4,03	1,05	0,53	1,66	1,02	0,90	1,50	3,53	3,96	4,03	1,02	0,90	1,50	2,71	1,50	4,04
	T.C.	Média		38,44	38,46		28,59	28,58		30,61	30,63		38,44	38,46		30,61	30,63		31,25	31,26
		S.D.		0,94	0,91		0,19	0,17		0,20	0,19		0,94	0,91		0,20	0,19		0,49	0,49
		C.V. (%)		2,44	2,38		0,67	0,60		0,64	0,62		2,44	2,38		0,64	0,62		1,56	1,56

Tabela 5.11 Controladores que utilizaram o método COG no volume baixo

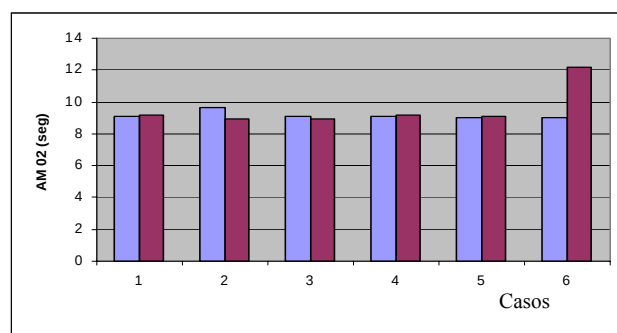
Medida		Estat.	Caso 1			Caso 2			Caso 3			Caso 4			Caso 5			Caso 6		
			Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2	Total	Apr. 1	Apr. 2
Desemp do Tráfego	A.M.	Média	10,19	13,20	9,15	9,36	10,50	8,96	9,91	12,72	8,90	10,19	13,20	9,15	9,99	12,51	9,09	13,19	13,40	12,20
		S.D.	0,34	0,76	0,43	0,30	0,51	0,29	0,36	0,97	0,46	0,34	0,76	0,43	0,34	0,99	0,41	0,38	0,51	1,75
		C.V. (%)	3,36	5,75	4,72	3,18	4,86	3,24	3,65	7,64	5,22	3,36	5,75	4,72	3,36	7,94	4,52	2,87	3,81	14,36
	P.P.	Média	40,07	51,91	35,94	39,50	46,66	36,97	40,16	52,65	35,78	40,07	51,91	35,94	40,43	51,35	36,60	47,58	50,46	46,59
		S.D.	1,49	2,61	2,23	1,65	3,27	1,41	1,48	3,49	1,71	1,49	2,61	2,23	1,56	4,82	1,83	1,79	2,23	2,17
		C.V. (%)	3,71	5,03	6,20	4,19	7,01	3,80	3,68	6,62	4,79	3,71	5,03	6,20	3,85	9,39	5,01	3,76	4,42	4,66
Desemp do Control	T.V.	Média	14,55	10,73	18,43	9,31	7,81	10,86	13,17	9,88	16,46	14,55	10,73	18,43	13,24	10,03	16,44	22,28	20,84	23,68
		S.D.	0,54	0,37	0,90	0,18	0,07	0,33	0,33	0,27	0,61	0,54	0,37	0,90	0,47	0,36	0,66	0,12	0,07	0,21
		C.V. (%)	3,74	3,41	4,88	1,89	0,90	3,06	2,54	2,71	3,68	3,74	3,41	4,88	3,58	3,62	4,03	0,52	0,32	0,90
	T.C.	Média		41,14	41,15		30,63	30,65		38,31	38,34		41,14	41,15		38,47	38,49		56,54	56,53
		S.D.		1,09	1,11		0,31	0,32		0,69	0,68		1,09	1,11		0,92	0,92		0,27	0,26
		C.V. (%)		2,66	2,69		1,02	1,05		1,81	1,78		2,66	2,69		2,39	2,38		0,47	0,46



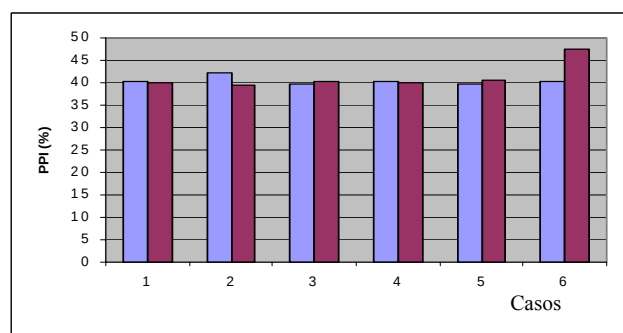
a) Atraso médio na interseção



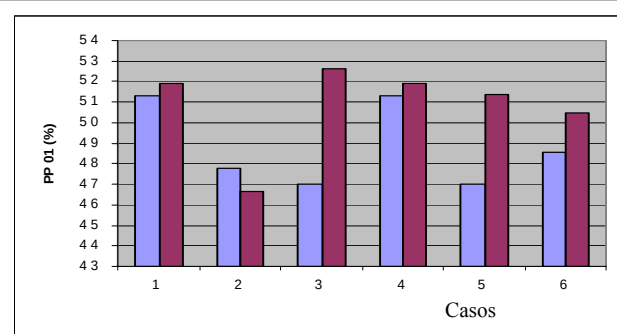
b) Atraso médio na via secundária



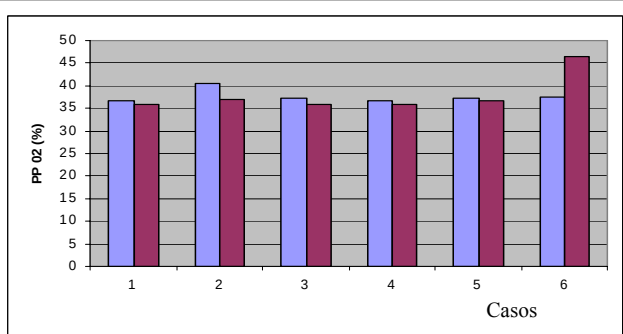
c) Atraso médio na via principal



d) % de paradas na interseção



e) % de paradas na via secundária



f) % de paradas na via principal



Controladores com Bissetor



Controladores com COG

Figura 5.6: Resultado da resposta dos controladores com defuzzificação Bissetor e COG: volume baixo

Analisando a Figura 5.4 e as Tabelas 5.6 e 5.7 pode-se inferir que para um volume alto com o método Bissetor de defuzzificação, o Caso 2 é o que apresenta, em termos absolutos o menor atraso médio e a menor porcentagem de veículos parados para as variáveis AMI, AM01, AM02, PPI e PP02. Para a variável PP01 o caso que apresentou o menor resultado foi o Caso 6 com o método COG.

Fazendo uma análise semelhante para o volume médio (ver Figura 5.5 e Tabelas 5.8 e 5.9) tem-se que o Caso 2 com bissetor, é o que produz menor média para as variáveis AMI, AM01 e PPI, porém, para as demais variáveis, os controladores com as menores médias absolutas foram: Caso 3 com bissetor - para a variável AM02; Caso 1 com Bissetor - para PP01; e Caso 5 com Bissetor - para PP02.

Quando o volume é alterado para baixo (ver tabelas 5.10 e 5.11 e Figura 5.6), o número de controladores com desempenho melhor é mais variado do que a ocorrência no nível alto. Assim, o Caso 3 com COG obteve um melhor desempenho nas variáveis PP02 e AM02, enquanto o caso 2 com COG foi melhor nas variáveis AM01, PPI e PP01. A Tabela 5.12 apresenta os controladores com os menores valores médios para as medidas de desempenho determinadas para os três níveis de volume de tráfego.

Tabela 5.12: Controladores com menores resultados para as medidas de desempenho de tráfego

		Controladores											
Volume	Variáveis	1B	2B	3B	4B	5B	6B	1C	2C	3C	4C	5C	6C
ALTO	AMI												
	AM01												
	AM02												
	PPI												
	PP01												
	PP02												
MÉDIO	AMI												
	AM01												
	AM02												
	PPI												
	PP01												
	PP02												
BAIXO	AMI												
	AM01												
	AM02												
	PPI												
	PP01												
	PP02												

Legenda:

Controlador 1B: Caso1 e Bissetor

Controlador 2B: Caso2 e Bissetor

Controlador 3B: Caso3 e Bissetor

Controlador 4B: Caso4 e Bissetor

Controlador 5B: Caso5 e Bissetor

Controlador 6B: Caso6 e Bissetor

Controlador 1C: Caso1 e COG

Controlador 2C: Caso2 e COG

Controlador 3C: Caso3 e COG

Controlador 4C: Caso4 e COG

Controlador 5C: Caso5 e COG

Controlador 6C: Caso6 e COG

Identificado os controladores com menor média para as variáveis que medem o desempenho do tráfego, faz-se mister identificar se há diferença significativa entre as médias dessas medidas de desempenho e, também, entre os valores médios das variáveis

que medem a resposta dos controladores. Para tanto, foram realizadas Análises de Variância (ANOVA) para cada uma das medidas consideradas: atraso médio, porcentagem de veículos parados, tempo médio de verde e tempo médio de ciclo em relação às aproximações principal, secundária e à interseção como um todo. Estas ANOVA's, levando-se em conta os resultados das 10 horas independentes de simulação para cada uma das aproximações e para a interseção como um todo, mostram que as diferenças observadas nas médias das medidas são estatisticamente significativas para o nível de significância (α) de 5%. Os resultados das ANOVA's, em termos da probabilidade da estatística F ser maior do que $F_{\text{calculado}}$ (indicada por "p") são apresentados no Anexo C. Valores de "p" inferiores ao nível de significância α implicam em $F_{\text{calculado}}$ maior do que $F_{\text{crítico}}$ e, portanto, que existe diferença significativa entre as médias produzidas pelas alternativas estudadas.

A ANOVA realizada para os controladores que atuaram com o método Bissetor (controladores 1B a 6B) nos volumes alto, médio e baixo revelou que não há diferença significativa apenas na variável PP01. Para o caso dos controladores que atuaram com o método COG (controladores 1C à 6C) há, também, diferença significativa em quase todas as médias das variáveis; a exceção fica por conta da variável AM01 do nível alto e da variável PP01 do nível médio, que não apresentaram diferença significativa para $\alpha = 5\%$.

Os pré-requisitos de normalidade e de homogeneidade que devem ser satisfeitos para que se possa aplicar a ANOVA foram devidamente observados. Com relação à normalidade, apesar dos poucos dados, pode-se afirmar, baseado na literatura, que as variáveis analisadas tendem a se distribuir de forma normal. Quanto à homogeneidade, Costa Neto (1985) garante que a ferramenta ANOVA é bastante robusta e que pequenos desvios nestes condicionantes não invalidam o ferramental.

Para verificar de forma mais específica entre quais alternativas os resultados são significativamente diferentes, foi utilizado o teste de Tukey (Costa Neto, 1985). As Tabelas 5.13 a 5.18 resumem, para as variáveis AMI, AM01, AM02, PPI, PP01, PP02, TVI, TV01, TV02 quais são os controladores que apresentam diferenças significativas entre as médias dos resultados considerados (para $\alpha = 5\%$). Foram estudados, em separado, os seis controladores correspondentes a cada um dos métodos de defuzificação. A análise conjunta dos 12 controladores é apresentada na Seção 5.6.

Tabela 5.13: Defuzificação BIS Volume: Alto

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(2,1)(3,1)(5,1)(6,1)(3,2)(4,2)(5,2)(6,2)(3,4)(4,5) (4,6)	2
AM01	(1,2)(1,3)(1,5)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)	2
AM02	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(4,5) (4,6)	-----
PPI	(1,2)(1,5)(4,6)(1,3)(1,6)(2,4)(3,4)(4,5)	-----
PP01	-----	-----
PP02	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(3,4)(4,6)(2,4)(4,5)	-----
TVI	(2,1)(1,6)(2,5)(3,6)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2, 6
TV01	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(4,5) (4,6)	2,
TV02	(1,2)(1,5)(2,3)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(1,6)(2,4)(2,6) (3,6)(4,6)	2, 6
TC01	(1,2)(1,6)(2,5)(3,6)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2, 6
TC02	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(3,6)(4,5) (4,6)(5,6)	2, 6

Tabela 5.14: Defuzificação BIS Volume: Médio

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,6)(3,4)(4,5)(4,6)	-----
AM01	(1,2)(2,3)(2,6)(2,4) (2,5)	2
AM02	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,4)(3,4)(4,5)(4,6)	-----
PPI	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,4)(3,4)(4,5)(4,6)	-----
PP01	-----	-----
PP02	(1,2)(1,6)(4,5)(1,3)(2,4)(4,6)(1,5)(3,4)	-----
TVI	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(3,6)(4,5) (4,6)(5,6)	2, 6
TV01	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(3,6)(4,5) (4,6)	2
TV02	(1,2)(1,6)(2,5)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2
TC01	(1,2)(1,6)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(3,6)(4,6) (1,5)(2,4)	2, 6
TC02	(1,2)(1,3)(1,5)(1,6)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)(3,4)(3,6)(4,5) (4,6)(5,6)	2, 6

Tabela 5.15: Defuzificação BIS Volume: Baixo

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(1,3)(2,3)(2,5)(3,4)(4,6)(1,5)(1,6)(4,5)	-----
AM01	(1,2)(1,6)(3,4)(1,3)(2,4)(4,5)(1,5)(4,6)	-----
AM02	(1,2)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)	2
PPI	(2,5)(2,3)	-----
PP01	-----	-----
PP02	(1,2)(2,3)(2,4)(2,5)(2,6)	2
TVI	(1,2)(1,6)(2,5)(3,4)(4,5)(1,3)(2,3)(2,6)(4,6) (1,5)(2,4)	2
TV01	(1,2)(1,6)(4,5)(1,3)(2,6)(4,6)(1,5)(2,4)(3,4)	-----
TV02	(1,2)(2,3)(3,4)(4,5)(1,3)(2,4)(4,6)(1,5)(2,5) (1,6)(2,6)	2
TC01	(1,2)(1,6)(2,6)(4,5)(1,3)(2,3)(3,4)(4,6)(1,5)(2,5)(2,4)	2
TC02	(1,2)(1,6)(2,5)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2

Tabela 5.16: Defuzificação COG Volume: Alto

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(1,2)(2,3)(3,4)(3,6)(5,6)(1,3)(2,4)(2,5)(4,5)(1,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
AM01	-----	-----
AM02	(1,2)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(1,5)(2,4)(3,6)	2
PPI	(1,2)(2,3)(2,5)(3,6)(5,6)(1,6)(2,4)(2,6)(4,6)	2, 6
PP01	(1,2)(2,6)(2,4)(3,6)	-----
PP02	(1,2)(1,5)(2,3)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(1,6)(2,4)(2,6) (3,6)(4,6)	2, 6
TVI	(1,2)(1,6)(2,5)(3,6)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2, 6
TV01	(1,2)(1,5)(2,3)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(1,6)(2,4)(2,6) (3,6)(4,6)	2, 6
TV02	(1,2)(1,5)(2,3)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(1,6)(2,4)(2,6) (3,6)(4,6)	2, 6
TC01	(1,2)(1,6)(2,5)(3,6)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(4,5)(1,5)(2,4) (3,4)(4,6)	2, 6
TC02	(1,2)(1,6)(2,5)(3,4)(4,5)(5,6)(1,3)(2,3)(2,6)(3,6)(4,6) (1,5)(2,4)	2, 6

Tabela 5.17: Defuzificação COG Volume: Médio

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
AM01	(1,2)(2,6)(2,4)	-----
AM02	(1,2)(1,6)(2,5)(3,6)(5,6)(2,3)(2,6)(2,4)(4,6)	2, 6
PPI	(1,2)(2,3)(2,4)(3,6)(2,5)(1,6) (2,6)(4,6)(5,6)	2, 6
PP01	-----	-----
PP02	(1,2)(2,4)(3,6)(2,5)(1,6)(2,6)(4,6)(2,3)(5,6)	2, 6
TVI	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
TV01	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
TV02	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
TC01	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
TC02	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6

Tabela 5.18: Defuzificação COG Volume: Baixo

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
AMI	(1,2)(1,6)(3,6)(2,3)(2,5)(4,6)(2,4)(2,6)(5,6)	2, 6
AM01	(1,2)(2,3)(2,6)(2,4)(2,5)	2
AM02	(1,6)(4,6)(2,6)(5,6)(3,6)	6
PPI	(1,6)(5,6)(2,6)(3,6)(4,6)	6
PP01	(1,2)(2,3)(2,4)(2,5)	-----
PP02	(1,6)(5,6)(2,6)(3,6)(4,6)	6
TVI	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6
TV01	(1,2)(2,3)(3,4)(4,6)(1,3)(2,4)(3,5)(5,6)(1,4)(2,5)(4,5) (1,5)(2,6)	2, 4, 5
TV02	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6

Tabela 5.18: Defuzificação COG Volume: Baixo (continuação)

Variáveis Dependentes	Pares de controladores que apresentaram diferenças nas médias	Controladores que são diferentes em todas as combinações
TC01	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2
TC02	(1,2)(2,3)(3,4)(5,6)(1,3)(2,4)(3,6)(1,5)(2,5)(4,5)(1,6) (2,6)(4,6)	2, 6

Analisando o teste de Tukey (Costa Neto, 1985) para as variáveis que determinam o desempenho do tráfego, pode-se concluir que existem, basicamente, dois tipos de situações quando se pondera acerca do desempenho do controlador em relação às variáveis de controle de tráfego. Para ilustrar o que foi dito, pode-se mencionar o Controlador 2B atuando no volume alto da variável atraso médio na interseção (AM01). Neste caso, este controlador é o de menor média, além de ser estatisticamente diferente de todos os outros controladores. Assim, ele é o melhor controlador para atuar sob o enfoque dessa variável na condição de volume e de característica da interseção estudada. Em outra situação de mesmo volume, para a variável porcentagem de veículos parados na via principal (PP02), o Controlador 2B é o de menor média além de ser estatisticamente diferente dos controladores 1 e 4. Assim, é indiferente a utilização dos Controladores 2, 3, 5 e 6. Daí pode-se inferir que os Controladores 2, 3, 5 e 6 são as melhores opções para reduzir a porcentagem de veículos parados na aproximação da via principal. Estas situações são ordinárias tanto para o controlador atuando com a defuzificação Bissetor quanto para a COG.

Para melhor visualização dos controladores estatisticamente diferentes, e dos não diferentes, as Tabelas 5.19 e 5.20 resumem esta informação, além de mostrar as maiores e menores médias e suas respectivas diferenças percentuais, quando são considerados em conjunto os seis casos de função de pertinência para cada um dos métodos de defuzificação analisados. Na Tabela 5.21 é apresentada uma comparação entre os doze controladores estudados com respeito aos valores das menores e maiores médias para as variáveis estudadas.

Tabela 5.19: Resumo do desempenho dos controladores com a defuzzificação BIS.

Volume	Variaveis	Control. com menor media	Control. Estat. Indiferentes	Control. Estat. Diferentes	Menor média	Maior média	Diferença (%) das médias
ALTO	AMI	2B		1, 3, 4,5,6	14,9	17,95	16,99
	AM01	2B		1,3,4,5,6	20,77	23,11	10,13
	AM02	2B	3	1,4,5,6	12,67	16,02	20,91
	PPI	2B	3, 5, 6	1,4	47,78	51,99	8,10
	PP01	4B	1,2,3,5,6		63,76	66,43	4,02
	PP02	2B	3, 5, 6	1,4,	38,45	46,07	16,54
MÉDIO	AMI	2B	5	1,3,4,6	11,72	13,69	14,39
	AM01	2B		1,3,4,5,6	15,75	17,89	11,96
	AM02	3B	2,5,6	1,4	10,31	12,28	16,04
	PPI	2B	3,5,6	1,4	41,09	45,68	10,05
	PP01	1B	2,3,4,5,6		58,58	61,42	4,62
	PP02	5B	2,3,6	1,4	34,73	40,06	13,31
BAIXO	AMI	3B	5,6	1,2,4,	9,39	9,99	6,01
	AM01	2B	3,5,6	1,4	10,16	12,51	18,78
	AM02	5B	2,3,4,6	1	9	9,67	6,93
	PPI	3B	1,4,5,6	2	39,78	42,3	5,96
	PP01	3B	1,2,4,5,6		47,01	51,31	8,38
	PP02	1B	3,4,5,6	2	36,58	40,39	9,43

Tabela 5.20: Resumo do desempenho dos controladores com a defuzzificação COG

Volume	Variáveis	Control. com menor media	Control. Estat. Indiferentes	Control. Estat. Diferentes	Menor media	Maior media	Diferença (%) das medias
ALTO	AMI	2C		1,3,4,5,6	16,04	19,6	18,16
	AM01	2C	1,3,4,5,6		22,5	23,64	4,82
	AM02	2C		1,3,4,5,6	13,56	17,76	23,65
	PPI	2C		1,3,4,5,9	47,78	53,5	10,69
	PP01	6C	1,4,5	2,3	61,84	66,9	7,56
	PP02	2C		1,3,4,5,6	40,53	50,32	19,46
MÉDIO	AMI	2C		1,3,4,5,6	12,12	16,27	25,51
	AM01	2C	3,5	1,4,6	17,22	19,27	10,64
	AM02	2C		1,3,4,5,6	10,4	14,6	28,77
	PPI	2C		1,3,4,5,6	41,6	50,08	16,93
	PP01	6C	1,2,3,4,5		58,8	60,53	2,86
	PP02	2C		1,3,4,5,6	35,29	47,15	25,15
BAIXO	AMI	2C		1,3,4,5,6	9,36	13,19	29,04
	AM01	2C		1,3,4,5,6	10,5	13,4	21,64
	AM02	3C	1,2,4,5	6	8,9	12,2	27,05
	PPI	2C	1,3,4,5	6	39,5	46,59	15,22
	PP01	2C	6	1,3,4,5	46,66	52,65	11,38
	PP02	3C	1,2,4,5	6	35,78	46,59	23,20

Tabela 5.21: Comparação entre todos os controladores estudados

Volume	Variáveis	Control. com menor média	Valor da menor média	Control. com maior média	Valor da maior média	Diferença (%) das médias
ALTO	AMI	2B	14,9	6C	19,6	31,54
	AM01	2B	20,77	4C	23,64	13,82
	AM02	2B	12,67	6C	17,76	40,17
	PPI	2B	45,88	6C	53,5	16,61
	PP01	6C	61,84	2C	66,9	8,18
	PP02	2B	38,45	6C	50,32	30,87
MÉDIO	AMI	2B	11,72	6C	16,27	38,82
	AM01	2B	15,75	1C	19,27	22,35
	AM02	3B	10,31	6C	14,6	41,61
	PPI	2B	41,09	6C	50,08	21,88
	PP01	1B	58,58	6B	61,42	4,85
	PP02	5B	34,73	6C	47,15	35,76
BAIXO	AMI	2C	9,36	6C	13,19	40,92
	AM01	2B	10,16	6C	13,4	31,89
	AM02	3C	8,9	6C	12,2	37,08
	PPI	2C	39,5	6C	47,58	20,46
	PP01	2C	46,66	3C	52,65	12,84
	PP02	3C	35,78	6C	46,59	30,21

Analisando os controladores que utilizaram o método de defuzzificação Bissetor (Tabela 5.19), pode-se apurar que o Controlador 2B apresentou melhor média em nove situações, sendo que o segundo melhor foi Controlador 3B, que apareceu em 4 situações. Destaca-se, ainda, que dentre as nove situações (variáveis associadas a volume de tráfego) em que não foi o controlador com menor média, os valores do Controlador 2B em 6 situações não são estatisticamente diferentes dos valores produzidos com os controladores com menor média. Estes números deixam claro que, de forma geral e absoluta, o Controlador 2B é o que apresenta os melhores resultados. Situação semelhante é encontrada quando se analisam os resultados da Tabela 5.20. O Controlador 2C apresentou o melhor resultado para 14 situações, e resultado não diferente estatisticamente do melhor resultado em 3 situações. Realizando a análise por volume conclui-se que para os volumes alto e médio o Controlador 2B é o que apresenta melhores resultados para a maioria das variáveis. Quanto ao nível baixo o controlador que menores médias produziu foi o Controlador 2C.

Em síntese, para a interseção considerada e para os níveis de volume estudados, o Caso 2 das funções de pertinência foi o que produziu os melhores resultados, especialmente quando associado ao método Bissetor de defuzificação. Assim, embora esse resultado não possa ser generalizado, ele mostra que de forma clara que o uso das funções triangulares e trapezoidais, associado ao método de defuzificação COG (Caso 1C), que é comumente empregado nos trabalhos relacionados a controladores semafóricos *fuzzy*, não deve ser selecionado a “priori”. Isto é, a sua utilização deve ser precedida de uma avaliação dos seus resultados frente a outras alternativas.

Por meio da Tabela 5.21 é possível verificar, que os impactos significativos da definição da forma das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* podem significar, se comparadas as alternativas que produzem resultados melhores e piores para os diferentes níveis de volume:

- a) Redução de 13% a 41% nos valores de atraso médio; e
- b) Redução de 4% a 35% nos valores da porcentagem de veículos parados

Finalmente, é necessário ressaltar que para a variável PP01, a ANOVA identificou diferença significativa entre as médias dos controladores. Contudo, o teste de Tukey não foi sensível o suficiente a um nível de significância de 5% para identificar quais foram os pares de controladores que se enquadram nessa situação. Estes casos ocorreram sempre nos três níveis de volume (alto, médio e baixo) dos controladores que utilizaram o método Bissetor de defuzificação. Embora não tenha sido encontrada uma explicação específica para essa situação, a literatura aponta que alguns dos testes que realizam a análise de contrastes, como é o caso do teste de Tukey, dependendo da situação, são mais ou menos robustos (Costa Neto, 1985).

5.6 ESTUDO EXPLORATÓRIO DA INTERAÇÃO DOS FATORES: FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA, VOLUME E TIPO DE DEFUZIFICAÇÃO.

Os estudos realizados na seção anterior tinham o objetivo de analisar especificamente o desempenho do tráfego sob a atuação de controladores projetados com diferentes funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy*. Nessa análise o tipo ou modelo de defuzificação estava pré-estabelecido, juntamente com o volume. Neta seção, busca-se fazer um estudo exploratório acerca do desempenho do tráfego sob a ação de controladores

distintos, tanto com relação às funções de pertinência quanto com relação aos métodos de defuzzificação.

Inicialmente, para cada um dos níveis de volume considerados, é analisado o efeito dos fatores “função de pertinência (FP)” e “métodos de defuzzificação (MD)”, além do efeito da interação entre os mesmos. Os resultados da ANOVA realizada com esse objetivo são apresentados na Tabela 5.22.

Os resultados da Tabela 5.22 mostram que, exceto pelas variáveis AM01 (atraso médio na via secundária) e PP02 (porcentagem de veículos parados na via principal), todas as medidas de desempenho são significativamente afetadas pelos fatores estudados (função de pertinência e métodos de defuzzificação). Os resultados mostram, também, que a interação desses fatores afeta significativamente as medidas de desempenho.

No caso da variável AM01, os resultados da ANOVA mostram que para os volumes alto e médio a interação entre os fatores não é estatisticamente significativa ao nível de significância de 5%. Quando foi realizada a análise isolada do impacto das funções de pertinência para os métodos Bissetor e COG em separado, verificou-se que somente para o método Bissetor a influência das funções era significativa. Ao analisar o método de defuzzificação também como um fator este se mostrou significativo e as funções de pertinência também.

Para a variável PP01, a análise das funções de pertinência como o único fator (para um dado método de defuzzificação e nível de volume) mostrou que para o método COG, esse fator era estatisticamente significativo para o nível de volume médio. Na análise conjunta dos fatores função de pertinência e método de defuzzificação (Tabela 5.22) é verificado que nenhum dos dois fatores afeta significativamente a variável.

Quanto às variáveis que indicam a resposta direta do controlador (TVI, TV01, TV02, TC01 E TC02) verifica-se que os dois fatores isolados e a interação entre eles são estatisticamente significativos para $\alpha = 5\%$.

Tabela 5.22: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: função de pertinência (FP) e método de defuzzificação (MD)

Variáveis	Fatores	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
		Medidas estatísticas		Medidas estatísticas		Medidas estatísticas	
		“F” Calculado	P	“F” Calculado	P	“F” Calculado	P
AMI	FP	428,767	0,00	473,709	0,00	170,222	0,00
	MD	111,708	0,00	122,357	0,00	81,747	0,00
	FP – MD	20,881	0,00	57,590	0,00	95,845	0,00
AM01	FP	34,103	0,00	79,483	0,00	97,233	0,00
	MD	10,698	0,00	21,038	0,00	29,709	0,00
	FP – MD	1,776	0,124	0,288	0,918	7,283	0,00
AM02	FP	355,847	0,00	182,242	0,00	11,018	0,001
	MD	100,814	0,00	48,541	0,00	17,876	0,00
	FP – MD	21,748	0,00	33,711	0,00	22,045	0,00
PPI	FP	200,920	0,00	145,553	0,00	6,753	0,011
	MD	45,168	0,00	39,223	0,00	16,461	0,00
	FP – MD	14,576	0,00	26,093	0,00	20,174	0,00
PP01	FP	8,952	0,003	0,007	0,932	8,677	0,004
	MD	6,819	0,00	0,354	0,879	3,994	0,002
	FP – MD	3,509	0,006	3,660	0,004	2,357	0,045
PP02	FP	281,908	0,00	179,001	0,00	1,128	0,291
	MD	72,624	0,00	48,825	0,00	26,165	0,00
	FP – MD	23,496	0,00	43,340	0,00	24,754	0,00
TVI	FP	1970,677	0,00	2339,682	0,00	3490,725	0,00
	MD	582,425	0,00	670,352	0,00	938,474	0,00
	FP – MD	75,053	0,00	190,107	0,00	704,017	0,00

Tabela 5.22: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: FP e MD
(continuação)

Variáveis	Fatores	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
		Medidas estatísticas		Medidas estatísticas		Medidas estatísticas	
		“F” Calculado	P	“F” Calculado	P	“F” Calculado	P
TV01	FP	1234,355	0,00	3532,200	0,00	3898,857	0,00
	MD	347,324	0,00	939,771	0,00	1440,955	0,00
	FP – MD	65,853	0,00	514,396	0,00	1541,798	0,00
TV02	FP	1682,763	0,00	1089,725	0,00	2088,467	0,00
	MD	527,619	0,00	339,426	0,00	543,991	0,00
	FP – MD	51,377	0,00	49,945	0,00	239,844	0,00
TC01	FP	1966,903	0,00	2292,099	0,00	3497,711	0,00
	MD	582,535	0,00	652,753	0,00	937,561	0,00
	FP – MD	75,192	0,00	186,936	0,00	703,299	0,00
TC02	FP	1953,107	0,00	2413,650	0,00	3535,659	0,00
	MD	579,786	0,00	688,634	0,00	946,760	0,00
	FP – MD	74,856	0,00	197,855	0,00	709,398	0,00

No caso da análise conjunta dos três fatores (função de pertinência (FP), método de defuzzificação (MD) e nível de volume), os resultados da ANOVA realizada (ver Tabela 5,23) mostram que, exceto para as variáveis AM01 e PP01, os três fatores, bem como as interações entre eles (dois a dois e três a três) são estatisticamente significativos para $\alpha = 5\%$,

No caso da variável AM01, os resultados mostram que, isoladamente, os três fatores são significativos, Porém, o impacto da interação “método de defuzzificação e funções de pertinência” não é significativo ao nível $\alpha = 5\%$, Para a variável PP01 os fatores “método de defuzzificação” e “funções de pertinência” não são significativos, do mesmo modo que a interação entre eles,

Tabela 5.23: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: FP, MD e volume

Variáveis	Fatores	MD - VOLUME	
		Medidas estatísticas	
		“F” calculado	Prob, do “F” crítico ser maior que “F” calculado
AMI	FP	1047,163	0,00
	Volume	10005,296	0,00
	MD	264,168	0,00
	FP*volume	50,935	0,00
	FP* MD	137,035	0,00
	Vol*MD	29,946	0,00
	FP*volume* MD	4,838	0,00
AM01	FP	198,979	0,00
	Volume	5523,055	0,00
	MD	56,141	0,00
	FP*volume	3,265	0,039
	FP* MD	1,861	0,101
	Vol*MD	1,893	0,045
	FP*volume* MD	3,579	0,00
AM02	FP	404,076	0,00
	Volume	2713,343	0,00
	MD	106,508	0,00
	FP*volume	56,586	0,00
	FP* MD	71,479	0,00
	Vol*MD	27,038	0,00
	FP*volume* MD	2,456	0,008
PPI	FP	225,432	0,00
	Volume	1259,728	0,00
	MD	59,103	0,00
	FP*volume	22,996	0,00
	FP* MD	55,439	0,00
	Vol*MD	14,651	0,00
	FP*volume* MD	3,099	0,001

Tabela 5.23: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: FP, MD e volume
(continuação)

Variáveis	Fatores	MD - VOLUME	
		Medidas estatísticas	
		“F” calculado	Prob, do “F” crítico ser maior que “F” calculado
PP01	FP	0,914	0,340
	Volume	861,982	0,00
	MD	0,689	0,632
	FP*volume	9,657	0,00
	FP* MD	1,701	0,134
	Vol*MD	5,220	0,00
	FP*volume* MD	3,470	0,00
PP02	FP	266,855	0,00
	Volume	505,954	0,00
	MD	75,361	0,00
	FP*volume	52,104	0,00
	FP* MD	80,617	0,00
	Vol*MD	29,201	0,00
	FP*volume *MD	3,970	0,00
TVI	FP	7059,808	0,00
	Volume	28740,340	0,00
	MD	1933,814	0,00
	FP*volume	27,671	0,00
	FP* MD	616,267	0,00
	Vol*MD	48,484	0,00
	FP*volume *MD	31996	0,00
TV1	FP	5595,139	0,00
	Volume	10612,651	0,00
	MD	1475,439	0,00
	FP*volume	92,407	0,00
	FP* MD	801,168	0,00
	Vol*MD	106,461	0,00
	FP*volume* MD	31,250	0,00

Tabela 5.23: Resultado da ANOVA para a interação dos fatores: FP, MD e volume (continuação)

Variáveis	Fatores	COG – BIS - VOLUME	
		Medidas estatísticas	
		“F” calculado	Prob, do “F” crítico ser maior que “F” calculado
TV02	FP	4391,491	0,00
	Volume	28503,605	0,00
	MD	1281,163	0,00
	FP*volume	5,571	0,004
	FP* MD	236,888	0,00
	Vol*MD	11,297	0,00
	FP*volume* MD	19,748	0,00
TC01	FP	6996,378	0,00
	Volume	283333,700	0,00
	MD	1911,779	0,00
	FP*volume	28,415	0,00
	FP* MD	609,213	0,00
	Vol*MD	48,554	0,00
	FP*volume* MD	32,104	0,00
TC02	FP	7127,316	0,00
	Volume	28889,888	0,00
	MD	1949,998	0,00
	FP*volume	28,541	0,00
	FP* MD	621,341	0,00
	Vol*MD	49,460	0,00
	FP*volume* MD	32,870	0,00

5.7 TÓPICOS CONCLUSIVOS

- ✓ Dado o objetivo da presente dissertação, que é o de avaliar o impacto das funções de pertinência sobre o desempenho do tráfego e sobre a resposta de controladores semafóricos *fuzzy*, foi feita inicialmente uma análise do impacto das alterações nessas funções para controladores com métodos de defuzzificação pré-estabelecidos (Bissetor e COG), e para três níveis específicos de volume de tráfego (alto, médio e baixo). Esta análise mostrou que, para cada um dos métodos de defuzzificação e nível de volume estudados, somente no caso das variáveis atraso médio e

porcentagem de veículos que pararam na aproximação da via secundária, sob o método COG, o impacto na situação de volume alto e médio, respectivamente, não é estatisticamente significativo, Isto é, ao projetar um controlador *fuzzy* para atender a um nível conhecido de volume, e pré-especificando o método de defuzzificação, a seleção da forma das funções de pertinência impactaria diretamente a resposta do controlador e o desempenho geral do tráfego na interseção e, em especial, na aproximação da via principal,

- ✓ Um ponto a destacar a partir dessa análise é que os resultados do desempenho do tráfego sob o controlador que apresenta as funções de pertinência do Caso1 e o método COG (controlador 1C), que é o padrão adotado na maioria dos controladores *fuzzy* presentes na literatura, somente produz as melhores medidas de desempenho no volume alto para a variável PP01 e AM01, Para esta variável, o controlador 1C só apresentou diferença significativa para os controladores 2C e 3C, Em relação ao nível médio, o controlador 1C não apresentou o melhor resultado para nenhuma variável deste volume de tráfego, Quanto ao volume baixo, o controlador 1C não apresenta diferença significativa em relação aos controladores com menores médias para as variáveis AM02, PPI e PP02, ou seja o Controlador 1C apresenta médias que são estatisticamente iguais para estas variáveis,
- ✓ Já o controlador 2B é o que em geral produziu os melhores resultados, Embora não se possa generalizar a respeito de qual o melhor controlador a ser usado para diferentes volumes de tráfego nas aproximações das vias principal e secundária, o presente estudo permite afirmar que a adoção do controlador 1C, sem uma análise prévia das condições do tráfego no local, não garante o uso integral do potencial de controlador semafórico *fuzzy*,
- ✓ A análise de um controlador para atender um dado volume de tráfego, que inclui o estudo da variação simultânea das funções de pertinência e do método de defuzzificação, mostrou que esses dois fatores afetam a maioria das medidas de desempenho e da resposta do controlador de forma isolada e através da interação entre eles, Assim, no projeto do controlador semafórico *fuzzy* para atender um dado volume a seleção das funções de pertinência, sempre que possível, deve ser acompanhada da seleção do método de defuzzificação de modo a determinar qual a

melhor combinação desses dois componentes que melhor atende as necessidades do tráfego no local, Esse tipo de estudo pode ser conduzido de acordo com o procedimento adotado neste capítulo,

- ✓ Finalmente, como era de esperar a partir das análises anteriores, o volume a ser atendido é uma variável que deve ser incluída explicitamente no projeto de um controlador semafórico *fuzzy*, Se esse volume apresentar variações importantes ao longo do período de controle, o controlador semafórico *fuzzy* precisa ser ajustado (pelo menos em termos das funções de pertinência e/ou método de defuzificação) para que o controle proporcionado seja o melhor possível, Essa situação implica no projeto de um controlador *fuzzy* que tenha essas características ajustadas em tempo real, Pesquisa nesse sentido encontra-se em andamento no Programa de Pós-Graduação em Transportes da UnB (PPGT-UnB),

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

6.1 INTRODUÇÃO

A lógica *fuzzy* e suas aplicações têm sido alvo de inúmeros estudos, uma vez que fornecem uma alternativa bastante promissora para modelagem de situações em que a utilização de técnicas matemáticas mais sofisticadas torna-se demasiadamente complexa, seja pelo ferramental a ser utilizado seja pela complexidade do sistema a ser modelado. Contudo, apesar da existência de vários trabalhos relacionados a controladores semafóricos *fuzzy*, a literatura não traz, até o momento, nenhuma pesquisa acerca da utilização de outras formas de funções de pertinência que não fossem a triangular e a trapezoidal para esse tipo de controlador. Assim, procurou-se com este trabalho contribuir para o preenchimento desta lacuna,

Com a utilização de um programa computacional que permite a simulação da operação do tráfego em interações controladas por semáforos, entre eles os controladores *fuzzy*, procurou-se verificar se a utilização de outras formas de função de pertinência acarreta diferenças significativas no desempenho do tráfego e na resposta do controlador semafórico,

Neste capítulo é apresentada uma análise do cumprimento dos objetivos propostos para este trabalho e da confirmação da hipótese formulada. São também indicadas as principais conclusões do estudo e apresentadas e recomendações para futuros trabalhos,

6.2 CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS

Esta dissertação teve como objetivo geral estudar a influência do tipo das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho do Controlador Semafórico *Fuzzy*. Tanto o objetivo geral quanto os específicos, foram plenamente alcançados. Através deste estudo foi comprovado que o desempenho do tráfego e a resposta do controlador são afetados significativamente quando o controlador semafórico *fuzzy* é projetado com diferentes funções de pertinência,

Destaca-se, ainda, que o cumprimento do objetivo específico relacionado ao estudo das funções de pertinência, além de fundamental para a presente pesquisa, forneceu subsídios para futuros trabalhos voltados a projetos de controladores *fuzzy* em geral com o uso do

programa MATLAB, A interpretação dos parâmetros de entrada no MATLAB para a implementação das diferentes funções de pertinência disponibilizadas pelo programa juntamente com a indicação de como determiná-los é uma contribuição importante para esses trabalhos,

Ressalta-se que o estudo foi restrito ao caso de uma interseção isolada, resultante do cruzamento de uma via principal e de outra secundária, operando com sentido único de circulação, Assim, embora os resultados obtidos em termos do melhor controlador não possam ser de modo algum generalizados, eles permitem concluir que a adoção do Controlador 1C, sem uma avaliação prévia de outras alternativas possíveis para as formas das funções de pertinência, deve ser evitada,

6.3 VERIFICAÇÃO DE HIPÓTESE

Este estudo teve a seguinte hipótese: “O tipo de função de pertinência utilizada afeta significativamente a resposta do Controlador Semafórico *Fuzzy* e, portanto, o desempenho do tráfego por ele controlado”,

Portanto, mediante os resultados obtidos tem-se que a hipótese não pode ser rejeitada,

6.4 PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS

Usando as respostas produzidas pelo simulador HUTSIM para as aproximações principal e secundária relacionadas às variáveis atraso médio e porcentagem de veículos parados, foram utilizados a ANOVA e o teste de Tukey para verificar quais controladores apresentaram medidas de desempenho significativamente diferentes para cada variável, Buscou-se identificar, também, qual das combinações de formas de função de pertinência (Casos 1 a 6) produziria o melhor controle para a interseção considerada, Foi verificado que o Caso 2, onde são utilizadas as funções Sigmoidal e Diferença de duas Sigmoidais, foi o que apresentou melhor resultado global, especificamente quando associado ao método Bissetor de defuzificação,

Constatou-se que o controlador que operou com as funções triangular e trapezoidal com o método Bissetor, Controlador 1B, obteve estatisticamente o melhor resultado apenas para a variável PP01 do volume médio, porém, o resultado obtido pelo controlador 1B, não é significativamente diferente para os outros 5 controladores,

Quanto ao controlador mais utilizado na literatura, Controlador 1C, ele não obteve a menor média em nenhum volume para qualquer variável, contudo suas médias são estatisticamente indiferentes aos controladores com menor média para as variáveis AM02, PPI e PP02 do volume baixo, Assim, constata-se que para a interseção estudada o controlador mais utilizado na literatura só obteve os melhores resultados para a metade das variáveis do volume baixo,

Através da Tabela 6,1 verifica-se que para o volume alto nas variáveis AMI e AM01 o Controlador 2B é estatisticamente o que produz os melhores resultados, Para este volume a variável PP01 apresentou o Controlador 6C como o que produz menor média, Contudo o seu resultado não é estatisticamente diferente do resultado de outros controladores, Utilizar o controlador 6C produz os mesmos resultados que utilizar os Controladores 1C, 4C e 5C,

Quanto ao volume médio, apenas para a variável AM01 pode-se identificar um único controlador como o que apresentava o melhor resultado e, ao mesmo tempo era estatisticamente diferente dos resultados produzidos por todos os demais controladores, Para esta variável o Controlador 2B é o que apresentou a melhor média,

Para o volume baixo nas variáveis AMI e AM01 os Controladores 2C e 2B são os que produziram melhores resultados respectivamente, Nestes dois casos não houve controladores com resultados estatisticamente iguais, Os resultados obtidos para cada variável estão na Tabela 6,1,

Tabela 6.1: Relação dos melhores controladores para as variáveis estudadas

Volume	Variáveis	Controladores com menor média	Controladores estatisticamente indiferentes ao de menor média
ALTO	AMI	2B	
	AM01	2B	
	AM02	2B	3
	PPI	2B	3, 5, 6
	PP01	6C	1, 4, 5
	PP02	2B	3, 5, 6
MÉDIO	AMI	2B	5
	AM01	2B	
	AM02	3B	2, 5, 6
	PPI	2B	3, 5, 6
	PP01	1B	2, 3, 4, 5, 6
	PP02	5B	2, 3 6
BAIXO	AMI	2C	
	AM01	2B	
	AM02	3C	1, 2, 4, 5
	PPI	2C	1, 3, 4, 5
	PP01	2C	6
	PP02	3C	1, 2, 4, 5

Pelos resultados obtidos por esta pesquisa pode-se concluir que, ao se projetar um controlador *fuzzy* para atender a um nível conhecido de volume, nas aproximações da interseção considerada e pré-especificando o método de defuzificação, a seleção da forma das funções de pertinência impacta diretamente a resposta do controlador e o desempenho geral do tráfego na interseção e, em especial, na aproximação da via principal,

Finalmente, como foi apresentado no Capítulo 5, o volume a ser atendido é uma variável que deve ser incluída explicitamente no projeto de um controlador semafórico *fuzzy*. Se ele não for previamente conhecido, ou se apresentar variações importantes ao longo do período de controle, o controlador semafórico *fuzzy* precisa ser ajustado (pelo menos em termos das funções de pertinência e/ou método de defuzificação) para que o controle proporcionado seja o melhor possível. Esse resultado corrobora a necessidade de estudos

voltados ao ajuste em tempo real dos elementos de projeto dos controladores semafóricos *fuzzy*, de forma a permitir a obtenção do máximo benefício que esse tipo de controlador pode oferecer, Estudos em andamento no PPGT-UnB procuram introduzir essa forma de ajuste através da associação de outras técnicas de inteligência artificial à Lógica *Fuzzy*,

6.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros associados ao tema da presente dissertação, São elas:

- a) definir uma interseção mais complexa, com mais aproximações, incluindo a possibilidade dos carros executarem movimentos mais próximos da realidade, como a ultrapassagem e a mudança de faixa, para avaliar o impacto das diferentes funções de pertinência nestas condições;
- b) estudar uma interseção mais complexa ou não que a utilizada neste trabalho, porém realizar as simulações com o programa HUTSIM calibrado para representar a operação de tráfego de uma cidade brasileira,

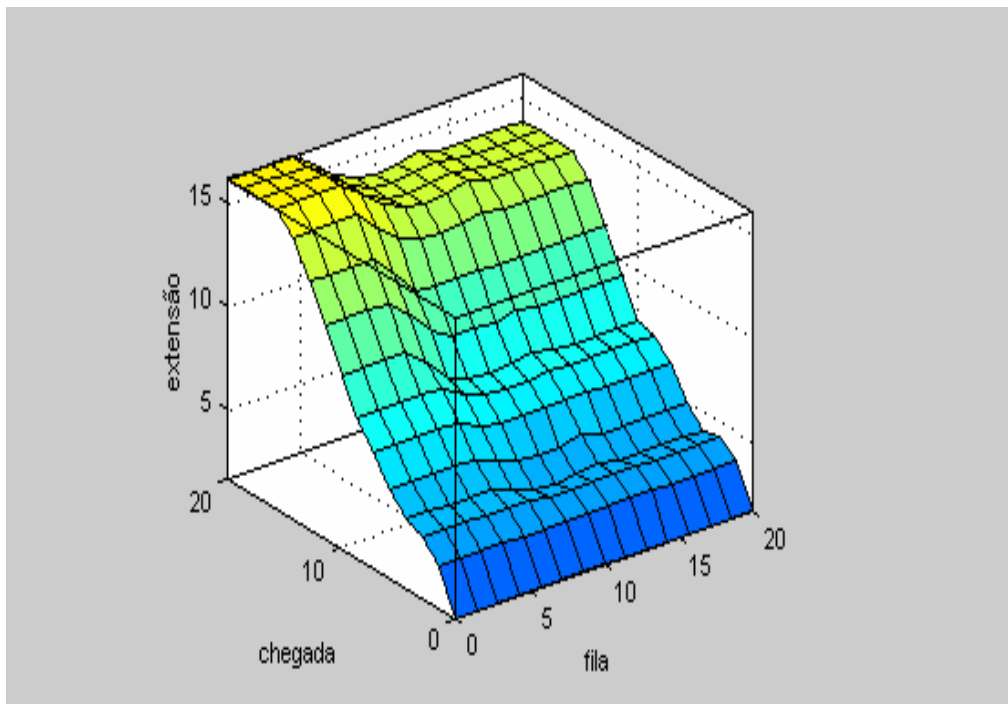
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAR, C, A, A, P, (2004) *Noções de Lógica Matemática*, Disponível em <http://www.pucsp.br/~logica>, acessado em 14/08/2004.
- ANDRADE, M. (2005) *Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos Fuzzy*. Dissertação de Mestrado, Publicação T.DM-012 A/2004, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 137p.
- AZEVEDO, F, M., L,M BRASIL., e R, C, L, OLIVEIRA, (2000) *Redes Neurais com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas*, Ed, Bookstore, Florianópolis.
- BINGHAM, E. (1998) *Neurofuzzy Traffic Signal Control*. Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Tecnology.
- CHAU, M, (2000) *Convite à Filosofia*, São Paulo, editora Ática.
- CHIU, S. (1992) *Adaptive Traffic Signal Control Using Fuzzy Logic*. *Proceedings of the Intelligent Vehicle Symposium*. Detroit. p. 98-107. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isNumber=6442>, acessado em 15/03/2005.
- COSTA NETO, P, L, O, (1985) *Estatística*, São Paulo: E Blucher, 1985.
- COSTA, N, C, A, (1992) *Introdução aos Fundamentos da Matemática*, 3 ed, São Paulo.
- CZOGALLA, O. (1997) *A Fuzzy Logic Application for traffic Actuated Signal Control*. IFAC Algorithms and Architectures in Real Time Control. Vilamoura. Portugal.
- FAVILLA, J., A. MACHION, e F. GOMIDE (1992) *Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies*. In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol 1, San Francisco.
- GADÊLHA, J, C., C,F,G, LOUREIRO, H, CUNHA JÚNIOR, (1999) *Aplicação da lógica fuzzy no controle semaforico de interseções isoladas*, In: *Anais do XIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, São Carlos, 8 a 11 de novembro de 1999, Vol,3, págs, 641 – 652.
- GUPTA, M, M., JIN, L., HOMMA, N, (2003) *Static and Dynamic Neural Networks*, Ed, New Jersey: Wiley & Jhons Inc.
- HOMBURGER, W. S., J. W. HALL, R. C. LOUTZENHEISER, E W. R. REILLY (1996) *Fundamentals of Traffic engineering*, 14th edition, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkerley.
- JACQUES, M, A, P., J, NIITTYMAKI, M, PURSULA, (2002a) *Analysing Different Fuzzy Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections*, In: *TRB 81st ANNUAL MEETING*, 2002, Washington, DC, TRB 81st Annual Meeting - CD Rom.

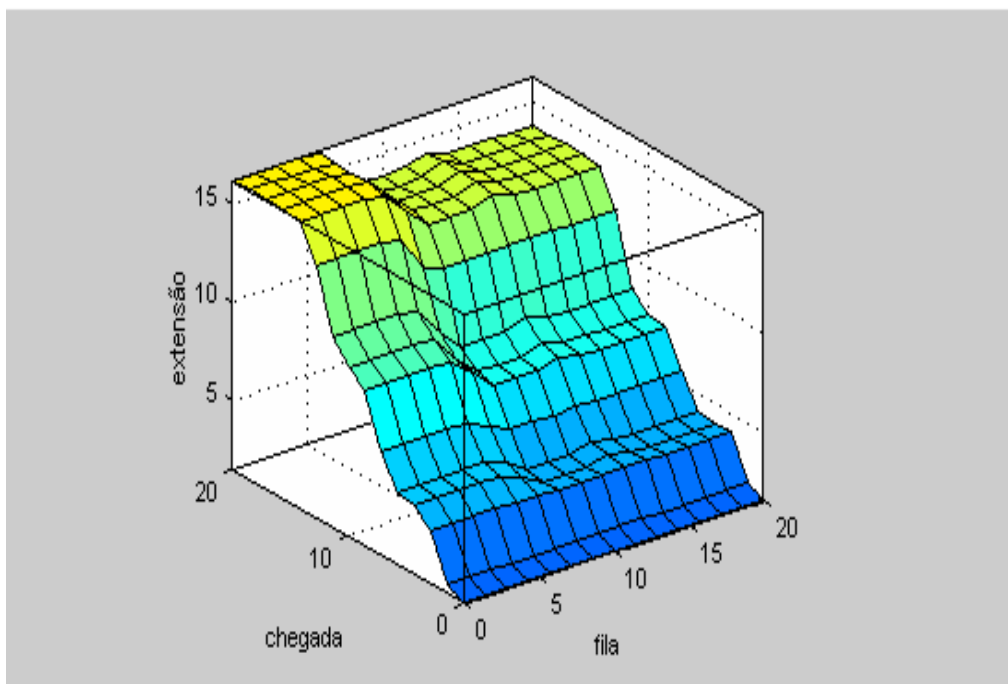
- JACQUES, M, A, P., J, NIITTYMAKI, M, PURSULA, I, KOSONEN, (2002b) *The Impact of Different Approximate Reasoning Methods on Fuzzy Signal Controllers*, Trabalho aceito para apresentação no 13th Mini-EURO Conference and 9th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, a ser realizado na Polytechnic University of Bari, Itália, de 10 a 13 de junho de 2002.
- JAYAKRISHNAN, R., S. P. MATTINGLY e M. G. MCNALLY (2000) Performance Study of SCOOT Traffic control System with Non-Ideal Detectorization: Field Operational Test in the City of Anaheim. UCI-ITS-WP-00-27. Institute of Transportation Studies. University of California, Irvine. Irvine, CA. 92697 – 3600, U.S.A. Disponível em: <http://www.its.uci.edu/its/publications/papers/WP-00-27.pdf>, consultado em: 13/06/2005
- KELL, J. H. e I. J. FULLERTON (1991) *Handbook of Traffic Signal Design*. Second Edition. Institute of Transportation Engineers. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- KLIR, George J, (1988), *Fuzzy sets, uncertainty, and information*, Englewood cliffs: Prentice Hall.
- KRONBORG, P., F. DAVIDSSON and J. EDHOLM (1997) *SOS – Self Optimising Signal Control, Development and Field of the SOS Algorithm for Self Optimising Signal Control at Isolated Intersection*. Publication 1997:2E, May/199, TFK – Transport Research Institute, Stockholm, Sweden
- KOSONEN, I, (1999), *HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications*, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Publication 100, Finland.
- KRONBORG, P. (1992) *MOVA and LHOVRA Traffic Signal Control for Isolated Intersections*. Publication 1992: 4E, ISBN: 91 8694 4762, Dec/ 1992, TFK - Transport Research Institute, Pipersgatan 27, S-112 28 Stockholm, Sweden.
- LEE, C,C, (1990), *Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller – Part II*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics.
- NIITTYMÄKI, J, (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and fuzzy Control*, Helsinki University of Newcastle upon Tyne, UK.
- NIITTYMÄKI, J., PURSULA, M, (2000), *Signal Control Using Fuzzy Logic, Fuzzy Sets and Systems*, Finland.
- NIITTYMÄKI, J., NEVALLA, 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., H, Mamdani (1977) *A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junction*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol, SMC-7, N° 10.
- PEDRYCZ, W, (1994) *Why Triangular Membership functions?* Vol, 64, No,1.

- ROCHESTER, T. A. (1991) *All Purpose Trunk Roads MOVA System of Traffic Control at Signals*. Vol. 8 – Traffic signs and lighting, Section 1 – Traffic control equipment, PART 1, TD 35/91
- RODRIGUES (2005), Metafísica de Aristóteles <http://www.ufma.br>, Acessado em: 20/03/2005.
- SANTOS, D, B, (2003) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos*, Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF.
- SANTOS, D, B,, JACQUES, M, A, P,, ANDRADE, M, (2004) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos*.
- 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.
- SCOOT-UTC (2001) SCOOT Urban Traffic Control Website. Disponível em <http://www.scoot-utc.com/> , consultado em 13/08/2004.
- TIGNOR, S. (1999) Coming to America: Innovative European traffic control. Better Roads Magazine, July, 1999. Rsi Copyright. Dallas, Texas. Disponível em: <http://www.betterroads.com/articles/brjuly99b.htm> consultado em: 13/09/2004
- UFSC (2005), Evolução dos Conceitos. Disponível em: <http://www.infufscbr/poo/hcomp/EvolucaoConceitual.html#kurt>, consultado em: 20/03/2005.
- WEBSTER, F. V. and B. M. COBBE (1996) *Traffic Signals*. Road Research Technical Paper. London. HMSO.
- ZADEH, L, A, (1965), *Fuzzy Sets, Information and Control*, Vol, 8, pp.
- 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, Nº 1,
- ZIR – Zakład Inżynierii Ruchu (2004) Traffic Engineering Company Website. Bytom – Poland. Disponível em: <http://www.zir.com.pl/e03a.html> consultado em 20/11/2004.

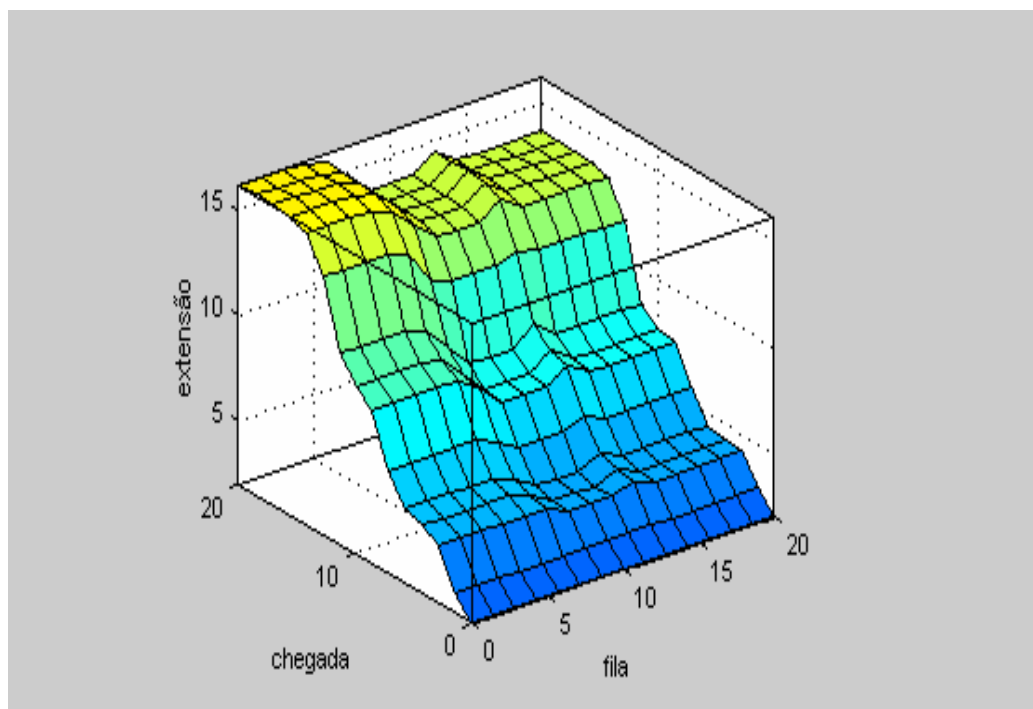
SUPERFÍCIES DE CONTROLE



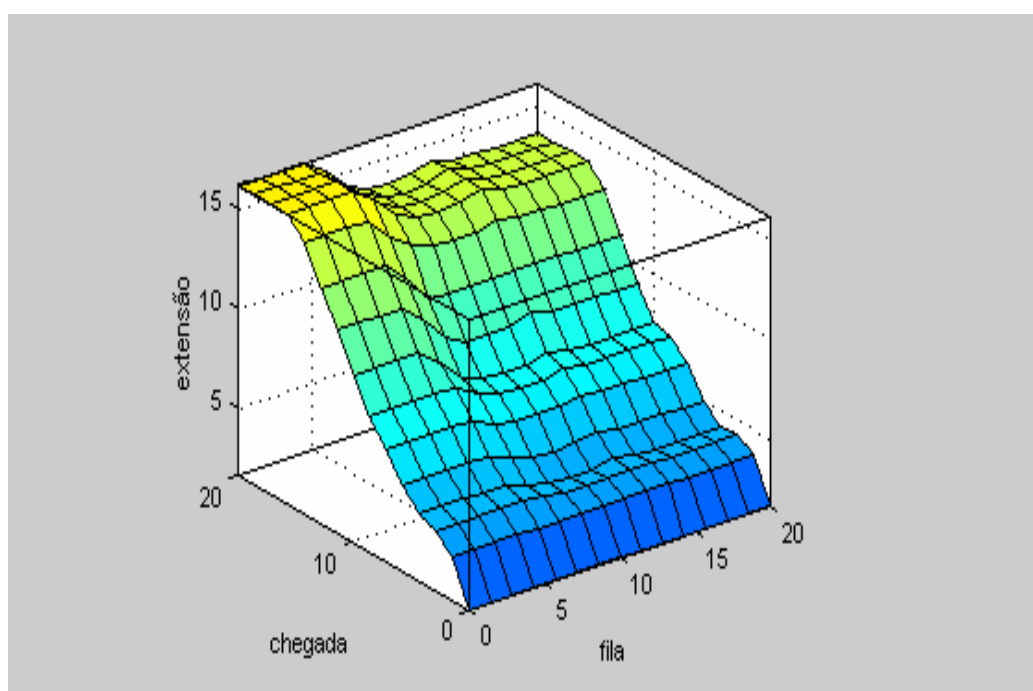
Controlador 1C – Triangular e Trapezoidal



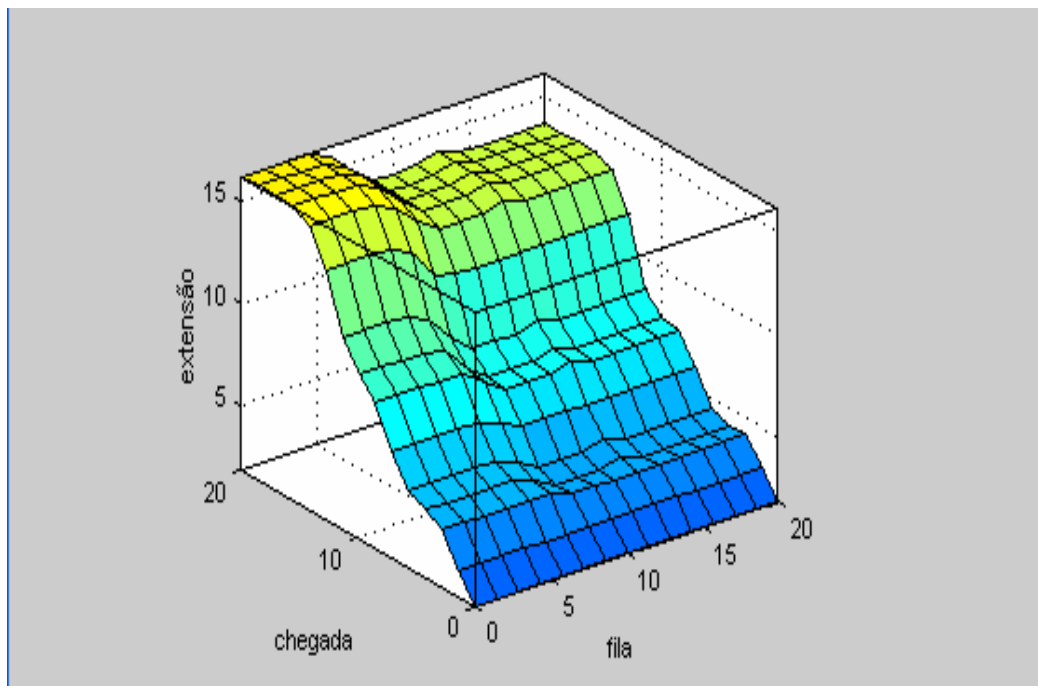
Controlador 2C – Sigmoidal e Diferença de Sigmoidal



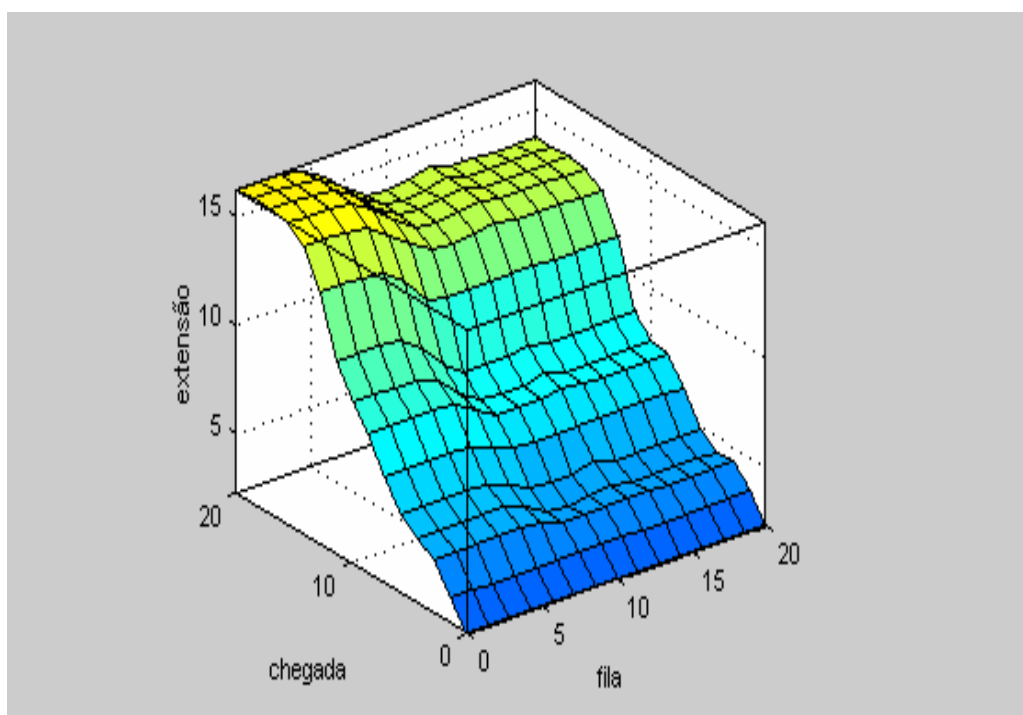
Controlador 3C – Sigmoidal e Sino



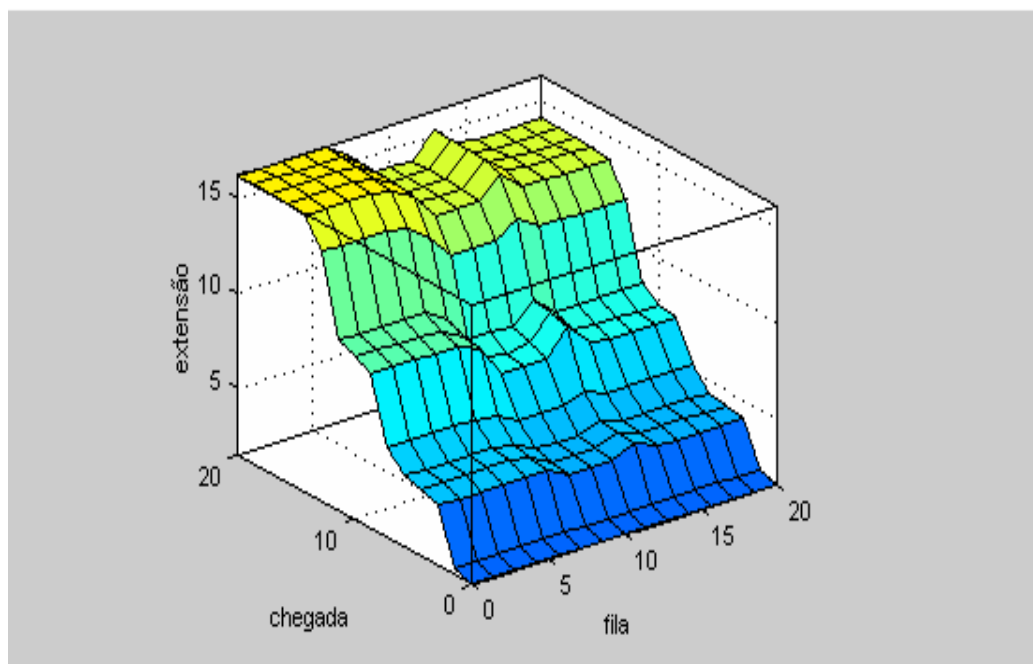
Controlador 4C – Triangular e Trapezoidal não padrão



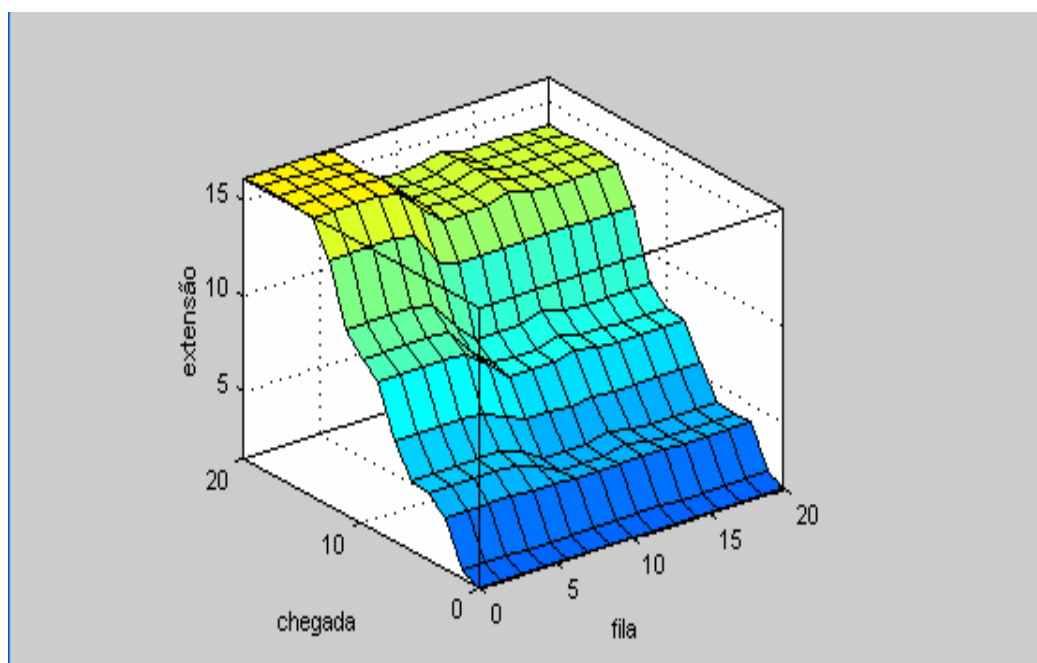
Controlador 5C – Z, forma de S, e Comb, Gaussiana



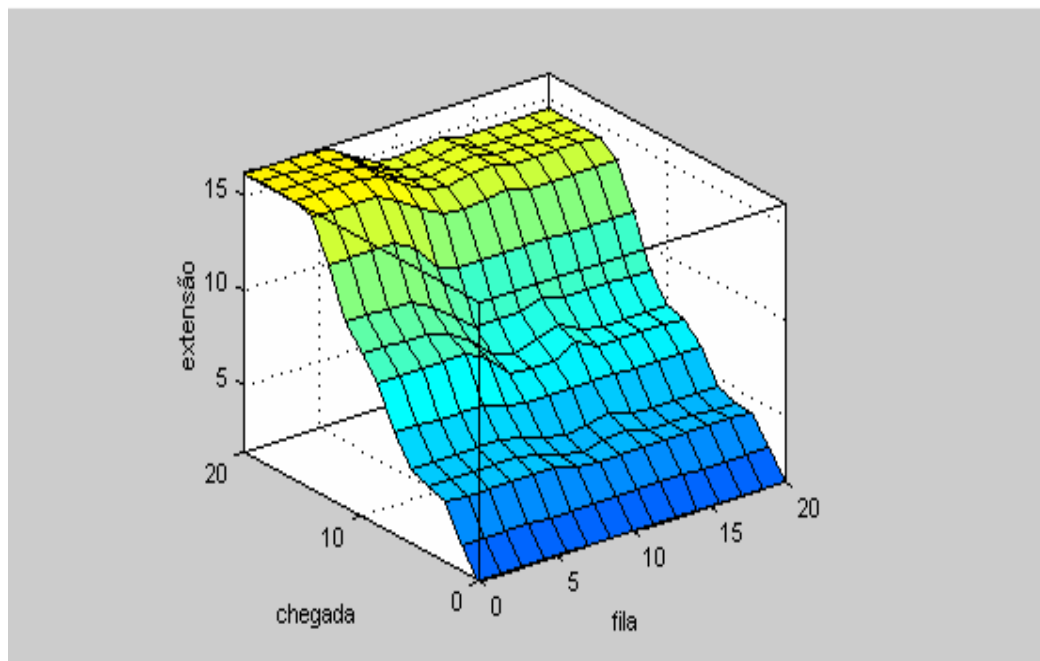
Controlador 6 C – Z, Forma de S e Gaussiana



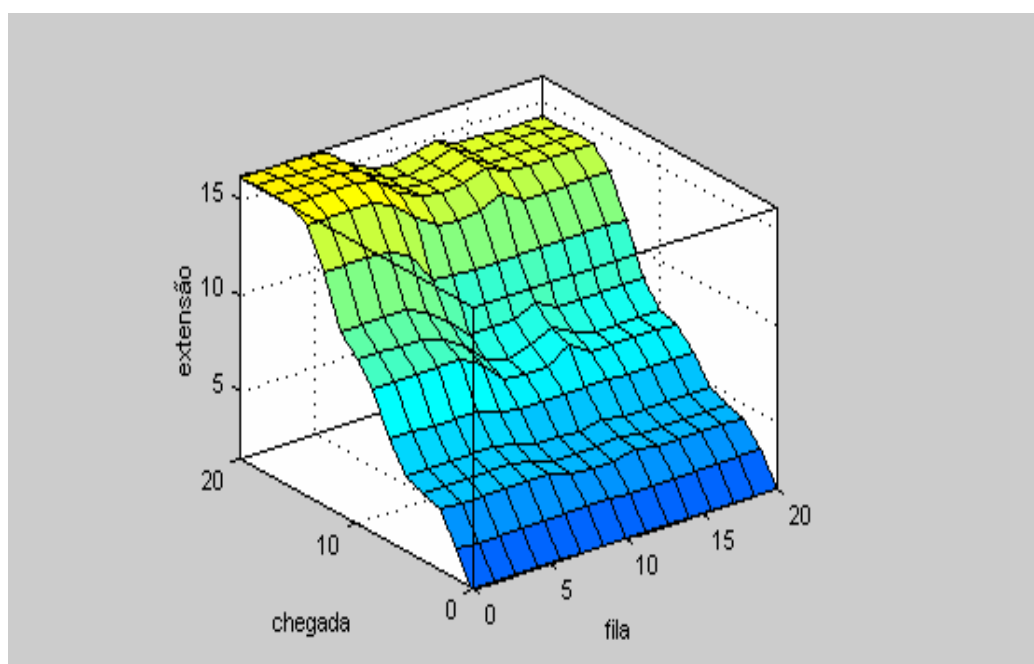
Controlador 1B – Triangular e Trapezoidal



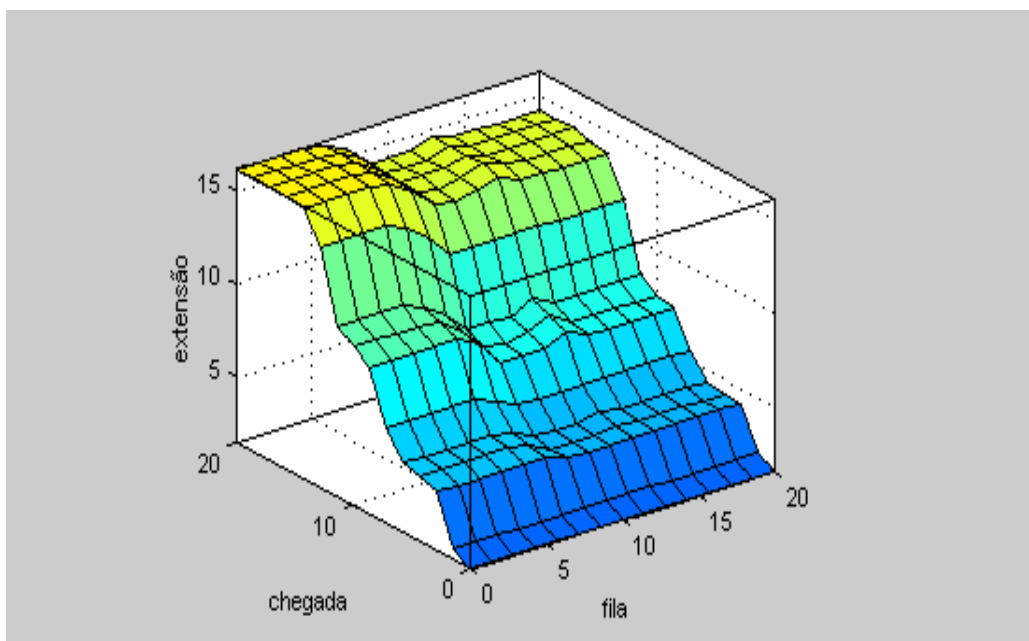
Controlador 2B – Sigmoidal e Diferença de Sigmoidal



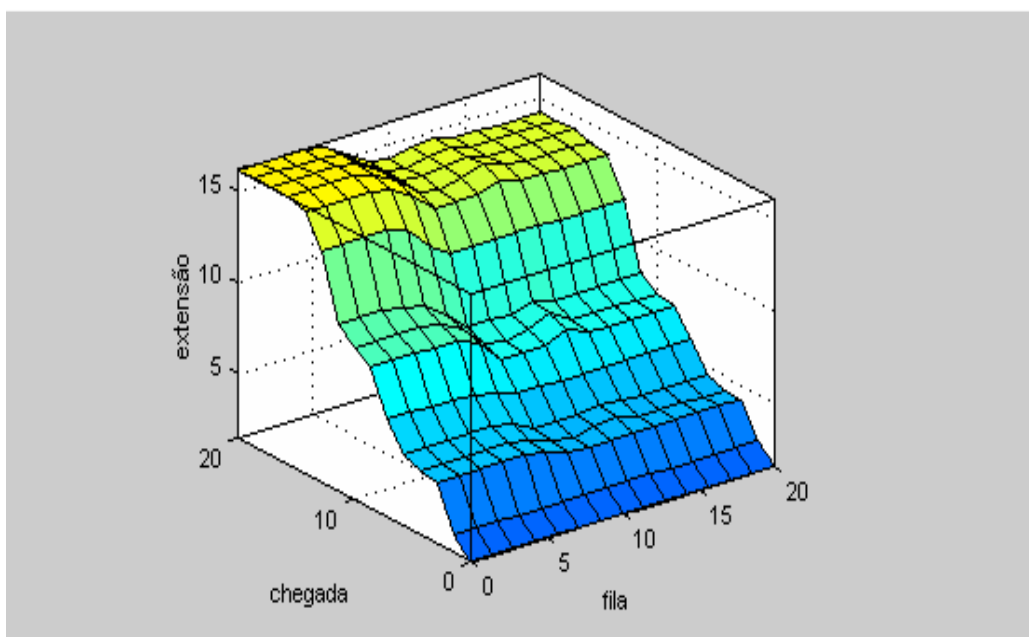
Controlador 3B – Sigmoidal e Sino



Controlador 4B – Triangular e Trapezoidal não padrão



Controlador 5B – Z, forma de S, e Comb, Gaussiana



Controlador 6 B – Z, Forma de S e Gaussiana

RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES
COM O HUTSIM

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume alto com o método de defuzzificação Bissetor

Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
				T	A,1	A, 2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio	1	19,1	23,8	17,2	15,0	20,6	12,8	16,6	22,6	14,3	19,1	23,4	17,3	16,1	22,2	13,7	16,7	23,4	14,1	
		2	17,6	23,8	15,2	15,4	20,7	13,3	15,7	22,6	13,0	17,5	23,0	15,4	16,3	22,4	13,9	16,4	23,4	13,6	
		3	17,7	21,0	16,5	14,9	21,0	12,7	15,7	23,5	12,9	17,7	21,0	16,5	15,9	23,3	13,3	16,1	22,8	13,7	
		4	17,6	22,5	15,7	14,4	21,0	11,9	15,2	21,6	12,7	17,4	23,0	15,2	15,1	21,0	12,8	15,8	21,3	13,8	
		5	18,3	24,6	16,0	15,4	20,9	13,4	15,9	22,2	13,5	18,3	23,8	16,3	16,3	22,2	14,1	16,6	24,7	13,6	
		6	17,5	23,6	15,3	14,2	20,4	12,0	15,4	23,3	12,6	17,4	23,7	15,2	15,5	23,1	12,7	15,9	23,2	13,3	
		7	18,0	23,1	15,9	14,7	20,1	12,6	15,6	21,4	13,3	17,7	23,2	15,6	15,9	22,1	13,4	16,1	21,8	13,8	
		8	17,6	22,0	16,0	15,0	20,5	13,0	15,6	22,4	13,1	18,0	22,2	16,5	15,9	23,2	13,2	15,8	22,8	13,2	
		9	18,6	23,7	16,5	15,4	22,1	12,7	16,8	22,8	12,7	18,8	23,5	16,9	16,4	22,7	13,8	16,8	22,2	13,8	
		10	17,5	23,0	15,4	14,6	20,4	12,3	15,8	20,9	13,8	17,4	22,8	15,3	15,9	22,0	13,5	16,1	22,5	13,5	
		Média	17,95	23,11	15,97	14,90	20,77	12,67	15,83	22,33	13,19	17,93	22,96	16,02	15,93	22,42	13,44	16,23	22,81	13,64	
		S,D,	0,52	0,99	0,59	0,40	0,52	0,47	0,48	0,78	0,52	0,58	0,79	0,73	0,37	0,66	0,43	0,35	0,90	0,25	
		C,V, (%)	2,90	4,29	3,72	2,72	2,51	3,74	3,00	3,51	3,92	3,25	3,44	4,58	2,35	2,93	3,23	2,17	3,97	1,83	
	Porcentagem de Veículos Parados	1	54,2	65,9	49,6	45,5	64,2	38,1	49,4	65,7	42,9	54,5	65,4	50,1	47,8	65,4	40,8	48,9	65,6	42,3	
		2	49,1	63,2	43,5	47,7	64,2	41,2	47,3	65,8	39,9	49,4	62,7	44,1	48,3	64,4	42,0	48,7	67,4	41,3	
		3	50,3	60,0	46,9	45,8	67,8	38,0	46,3	69,8	38,0	50,5	60,1	47,1	47,5	70,1	39,4	47,4	67,3	40,3	
		4	51,2	64,4	46,2	45,6	67,4	37,3	45,9	65,3	38,5	50,0	64,9	44,3	46,1	66,1	38,5	47,6	62,9	41,8	
		5	50,9	66,0	45,3	47,0	64,3	40,6	47,1	65,4	40,4	51,6	66,0	46,3	48,1	65,4	41,7	47,8	69,1	39,9	
		6	49,7	66,4	43,8	42,7	63,6	35,3	45,8	68,5	37,7	50,0	66,7	44,0	45,9	68,8	37,7	46,1	67,6	38,4	
		7	51,1	63,3	46,2	46,3	64,4	39,1	46,8	63,9	40,0	51,3	64,3	46,1	47,4	65,2	40,4	48,1	63,0	42,2	
		8	50,0	61,5	45,8	45,7	64,9	38,5	45,6	67,4	37,5	50,5	61,4	46,5	46,7	68,1	38,7	45,7	67,1	37,8	
		9	51,1	62,8	46,3	46,9	68,1	38,3	48,8	66,5	41,7	51,8	62,3	47,5	48,2	66,7	40,7	48,8	64,8	42,3	
		10	50,3	64,4	44,8	45,6	65,1	38,1	48,2	62,3	42,7	50,0	63,8	44,7	47,7	64,1	41,4	46,1	63,9	39,2	
		Média	50,79	63,79	45,84	45,88	65,40	38,45	47,12	66,06	39,93	50,96	63,76	46,07	47,37	66,43	40,13	47,52	65,87	40,55	
		S,D,	1,31	1,95	1,64	1,27	1,60	1,56	1,25	2,05	1,91	1,39	2,00	1,81	0,81	1,88	1,40	1,13	2,04	1,60	
		C,V, (%)	2,58	3,06	3,57	2,78	2,45	4,06	2,65	3,10	4,78	2,73	3,14	3,93	1,72	2,83	3,49	2,37	3,09	3,94	

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume alto com o método de defuzificação Bissetor (continuação)

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume alto com o método de defuzzificação Dissector (continuação)																						
Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6			
				T	A,1	A, 2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	31,2	23,2	39,4	21,6	14,1	29,1	25,5	16,9	34,1	31,4	23,5	39,4	24,9	16,1	33,7	27,8	18,4	37,0		
		2	30,6	21,9	39,1	20,5	13,3	27,7	24,8	15,8	33,7	30,0	21,6	38,3	25,5	16,8	34,2	26,5	17,4	35,8		
		3	30,2	21,6	38,7	20,1	12,1	28,1	23,9	14,5	33,3	30,2	21,6	38,7	23,9	14,7	33,1	25,3	15,7	34,8		
		4	29,7	21,1	38,4	20,0	12,7	27,3	24,4	15,9	33,0	29,3	20,9	38,0	23,8	15,6	32,1	25,4	16,6	34,2		
		5	30,1	21,1	39,0	20,5	12,8	28,2	25,2	15,8	34,7	30,2	21,3	39,0	25,6	16,4	34,8	26,1	16,6	35,7		
		6	29,4	20,3	38,7	21,2	12,6	29,6	24,7	15,5	34,1	29,4	20,4	38,6	24,1	14,8	33,5	25,5	15,7	35,3		
		7	30,7	22,3	39,0	21,5	14,0	29,0	24,8	16,5	33,2	30,1	21,9	38,4	25,3	17,1	33,7	25,7	17,4	34,2		
		8	30,6	21,7	39,6	20,8	12,9	28,7	24,3	15,3	33,2	30,5	21,5	39,8	25,1	16,0	34,2	26,0	16,2	35,7		
		9	30,8	22,2	39,2	20,9	13,2	28,7	25,9	17,3	34,6	30,8	22,4	38,9	25,2	16,2	34,1	26,1	17,6	34,6		
		10	29,2	20,3	38,2	20,7	12,6	28,7	24,4	16,1	32,5	29,2	20,4	38,1	24,4	15,9	32,7	26,8	17,3	36,2		
		Média	30,25	21,57	38,93	20,78	13,03	28,51	24,79	15,96	33,64	30,11	21,55	38,72	24,78	15,96	33,61	26,12	16,89	35,35		
		S,D,	0,62	0,86	0,41	0,51	0,60	0,65	0,57	0,76	0,68	0,66	0,88	0,54	0,64	0,73	0,76	0,72	0,83	0,86		
		C,V, (%)	2,04	3,98	1,06	2,46	4,61	2,29	2,30	4,78	2,03	2,18	4,09	1,40	2,58	4,58	2,26	2,76	4,94	2,43		
	Tempo Médio de Ciclo	1		74,6	74,5		55,2	55,2		62,8	63		74,9	74,8		61,6	61,9		67,2	67,3		
		2		72,9	73		53	52,9		61,5	61,5		72	71,9		63	62,7		65,3	65,1		
		3		72,2	72,3		52,1	52,1		59,8	59,7		72,2	72,3		59,8	59,7		62,5	62,6		
		4		71,4	71,3		52	51,8		60,9	60,6		70,7	70,6		59,7	59,5		62,8	62,9		
		5		72,2	72,2		53	53		62,5	62,7		72,3	72,2		63,1	63,1		64,3	64,3		
		6		71,1	71,1		54,2	54,1		61,5	61,5		71,1	71,1		60,3	60,4		63	63		
		7		73,6	73,3		55,1	55,1		61,6	61,7		72,5	72,3		62,7	62,7		63,5	63,6		
		8		73,3	73,2		53,5	53,6		60,4	60,5		73,2	73,1		62,2	62,1		63,8	63,9		
		9		73,4	73,6		53,9	53,9		63,9	63,8		73,4	73,6		62,4	62,4		64,3	64,4		
		10		70,4	70,6		53,2	53,4		60,5	60,6		70,4	70,6		60,5	60,6		65,5	65,5		
		Média		72,51	72,51		53,52	53,51		61,54	61,56		72,27	72,25		61,53	61,51		64,22	64,26		
		S,D,		1,22	1,17		1,04	1,07		1,18	1,22		1,29	1,26		1,27	1,27		1,37	1,35		
		C,V, (%)		1,69	1,62		1,95	2,00		1,92	1,98		1,78	1,75		2,06	2,06		2,14	2,10		

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume médio com o método de defuzificação Bissetor

Medida		H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio	1	13,6	17,6	12,2	12,0	15,3	10,8	11,7	16,6	10,0	13,6	17,6	12,2	11,6	17,0	9,7	11,9	17,0	10,1
		2	13,6	18,8	11,9	11,4	16,0	9,9	11,8	16,9	10,1	13,5	18,4	11,9	11,8	17,2	10,1	12,1	18,3	10,0
		3	14,2	18,5	12,8	12,2	17,0	10,6	12,1	16,9	10,5	14,4	18,7	12,9	11,9	16,8	10,2	12,6	17,9	10,7
		4	13,5	17,7	11,9	11,9	15,7	10,5	12,3	16,8	10,6	13,5	17,7	11,9	12,3	16,8	10,7	12,8	17,1	11,3
		5	13,6	18,0	12,3	11,9	15,4	10,8	12,4	19,1	10,3	13,7	18,0	12,4	12,7	19,2	10,7	12,4	19,0	10,3
		6	13,9	18,8	12,2	11,7	16,2	10,3	12,1	17,0	10,5	14,1	18,6	12,5	11,8	17,0	10,1	12,4	18,8	10,3
		7	13,7	18,0	12,4	11,5	16,3	10,0	12,0	17,4	10,2	13,7	18,1	12,3	12,1	16,9	10,5	12,3	17,8	10,5
		8	13,5	16,8	12,3	11,6	15,2	10,3	12,1	17,1	10,4	13,5	16,8	12,3	12,1	16,9	10,4	12,2	17,6	10,3
		9	14,0	17,7	12,7	11,7	15,2	10,5	12,4	16,9	10,5	14,0	17,7	12,7	12,3	16,6	10,8	12,9	17,6	10,8
		10	12,8	16,7	11,6	11,3	15,2	10,1	11,7	17,0	10,0	12,9	16,5	11,7	11,8	17,5	10,0	12,3	17,8	10,0
		Média	13,64	17,86	12,23	11,72	15,75	10,38	12,06	17,17	10,31	13,69	17,81	12,28	12,04	17,19	10,32	12,39	17,89	10,43
		S,D,	0,36	0,69	0,35	0,27	0,58	0,30	0,25	0,67	0,21	0,39	0,68	0,35	0,31	0,71	0,34	0,29	0,62	0,39
		C,V, (%)	2,61	3,88	2,83	2,28	3,68	2,88	2,07	3,92	2,06	2,84	3,84	2,89	2,58	4,13	3,29	2,35	3,46	3,71
	Porcentagem de Veículos Parados	1	45,0	59,2	40,1	42,2	58,2	36,7	40,7	59,5	34,3	45,0	59,2	40,1	39,5	60,0	32,4	41,4	63,9	33,6
		2	44,2	59,0	39,3	40,0	59,8	33,6	41,3	59,8	35,2	44,2	58,5	39,5	41,3	61,8	34,6	41,0	61,0	34,4
		3	46,4	60,3	41,6	42,0	60,3	35,6	41,4	59,6	35,0	47,0	61,8	41,9	40,0	59,9	33,1	43,0	61,8	36,5
		4	45,6	59,1	40,7	42,0	58,9	35,9	43,0	57,2	37,9	45,6	59,1	40,7	42,1	56,4	36,9	43,4	57,9	38,2
		5	43,4	60,2	38,2	40,3	56,0	35,4	42,4	66,8	34,8	43,8	60,2	38,7	43,8	67,1	36,6	41,3	65,0	33,9
		6	45,4	60,9	40,2	41,3	61,4	34,6	40,9	60,7	34,2	45,2	60,7	40,0	39,6	61,4	32,3	40,8	62,4	33,5
		7	44,5	56,8	40,6	39,4	58,2	33,3	40,4	59,7	34,3	44,4	56,8	40,4	40,6	58,2	35,0	40,5	61,3	33,8
		8	44,4	55,3	40,6	42,2	59,4	36,1	41,4	58,7	35,4	44,4	55,3	40,6	42,0	60,1	35,6	40,6	59,4	34,0
		9	45,4	59,8	40,5	41,7	58,1	36,1	42,9	62,3	36,3	45,4	59,8	40,5	42,2	59,3	36,3	44,1	61,8	38,1
		10	42,3	55,2	38,2	39,8	57,0	34,3	39,8	61,0	33,1	42,5	55,7	38,2	41,8	64,5	34,5	41,4	59,7	35,6
		Média	44,66	58,58	40,00	41,09	58,73	35,16	41,42	60,53	35,05	44,75	58,71	40,06	41,29	60,87	34,73	41,75	61,42	35,16
		S,D,	1,12	1,97	1,05	1,04	1,50	1,09	1,01	2,46	1,25	1,14	2,04	1,00	1,29	2,92	1,60	1,21	2,00	1,74
		C,V, (%)	2,51	3,36	2,63	2,54	2,56	3,10	2,43	4,06	3,56	2,55	3,48	2,50	3,13	4,79	4,60	2,89	3,25	4,96

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume médio com o método de defuzificação Bissetor (continuação)

Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
				T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	22,5	16,1	29,1	13,3	8,8	17,9	16,5	10,2	22,8	22,5	16,1	29,1	16,4	10,3	22,7	17,0	10,6	23,5	
		2	22,6	15,6	29,8	13,6	8,7	18,5	16,7	10,4	23,0	22,6	15,6	29,8	16,5	10,4	22,7	17,9	10,9	24,9	
		3	22,8	15,8	29,7	14,3	9,0	19,5	17,2	10,7	23,6	22,8	15,9	29,6	17,1	10,6	23,6	17,6	10,9	24,4	
		4	21,2	15,0	27,4	12,8	8,8	16,8	15,5	10,4	20,6	21,1	15,0	27,3	15,6	10,5	20,5	16,8	11,3	22,1	
		5	22,4	15,1	29,8	13,4	8,7	18,1	17,3	10,1	24,3	22,4	15,2	29,7	17,0	10,2	23,7	18,2	10,7	25,5	
		6	21,6	14,6	28,6	13,7	8,7	18,7	16,7	10,3	23,1	21,6	14,8	28,4	16,7	10,5	22,8	17,6	10,6	24,6	
		7	22,2	15,5	29,0	13,6	8,7	18,7	16,4	10,1	22,7	22,2	15,4	29,1	16,3	10,2	22,6	16,5	10,2	22,8	
		8	22,6	16,1	29,1	13,0	8,6	17,5	16,5	10,5	22,4	22,6	16,1	29,1	16,2	10,5	21,9	16,8	10,8	22,7	
		9	22,5	15,7	29,2	13,5	8,8	18,3	16,0	10,2	21,9	22,5	15,7	29,2	16,5	10,5	22,6	16,8	11,0	22,7	
		10	21,7	14,9	28,5	13,2	8,2	18,0	16,2	9,9	22,4	21,7	14,8	28,6	16,2	9,9	22,5	17,3	10,6	23,8	
		Média	22,21	15,44	29,02	13,44	8,70	18,20	16,50	10,28	22,68	22,20	15,46	28,99	16,45	10,36	22,56	17,25	10,76	23,70	
		S,D,	0,50	0,49	0,69	0,39	0,19	0,70	0,51	0,22	0,94	0,52	0,47	0,70	0,41	0,20	0,85	0,53	0,28	1,07	
		C,V, (%)	2,26	3,18	2,39	2,92	2,24	3,84	3,07	2,12	4,15	2,35	3,06	2,43	2,48	1,94	3,75	3,07	2,60	4,51	
	Tempo Médio de Ciclo	1		57	57,1		38,5	38,6		45	45,1		57	57,1		44,9	44,9		46,1	46,1	
		2		57,3	57,4		39,2	39,2		45,3	45,3		57,3	57,4		45,1	45,1		47,7	47,7	
		3		57,6	57,4		40,6	40,6		46,4	46,3		57,6	57,4		46,1	46,1		47,5	47,3	
		4		54,4	54,4		37,6	37,6		43	43,1		54,3	54,3		43	43,1		45,4	45,5	
		5		56,9	57,1		38,8	38,8		46,4	46,4		56,9	57,1		46	45,8		48,3	48,2	
		6		55,2	55,3		39,5	39,4		45,3	45,4		55,2	55,3		45,2	45,4		47,1	47,2	
		7		56,5	56,5		39,2	39,3		44,8	44,8		56,5	56,5		44,6	44,7		45,1	45	
		8		57,2	57,1		38,2	38		44,7	44,9		57,2	57,1		44,2	44,4		45,4	45,5	
		9		57	57,2		39,1	39,2		44	44,1		57	57,2		45	45,1		45,8	45,6	
		10		55,4	55,5		38,1	38,3		44,2	44,3		55,4	55,5		44,4	44,4		46,3	46,5	
		Média		56,45	56,50		38,88	38,90		44,91	44,97		56,44	56,49		44,85	44,90		46,47	46,46	
		S,D,		1,01	1,00		0,80	0,80		0,99	0,94		1,03	1,02		0,85	0,80		1,05	1,03	
		C,V, (%)		1,80	1,77		2,07	2,06		2,20	2,09		1,83	1,81		1,89	1,78		2,27	2,22	

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume baixo com o método de defuzificação Bissetor

Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
				T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio		1	9,6	11,9	8,9	9,7	9,0	10,0	9,6	10,0	9,5	9,6	11,9	8,9	9,6	10,0	9,5	9,6	11,2	9,0
			2	10,1	14,1	8,7	9,7	9,8	9,6	9,9	10,9	9,5	10,1	14,1	8,7	9,9	10,9	9,5	9,4	11,0	8,8
			3	10,1	12,0	9,4	9,8	10,7	9,5	9,5	10,6	9,2	10,1	12,0	9,4	9,5	10,6	9,2	10,0	11,9	9,3
			4	10,4	14,2	9,0	10,0	10,2	9,9	9,3	11,0	8,7	10,4	14,2	9,0	9,3	11,0	8,7	9,5	11,0	8,9
			5	9,6	10,9	9,3	9,9	9,5	10,0	8,9	10,3	8,5	9,6	10,9	9,3	8,9	10,3	8,5	9,4	10,2	9,2
			6	10,0	12,0	9,3	9,9	10,2	9,8	9,4	10,0	9,3	10,0	12,0	9,3	9,4	10,0	9,3	9,6	10,8	9,2
			7	10,7	12,2	10,2	9,5	10,3	9,3	9,7	11,5	9,1	10,7	12,2	10,2	9,7	11,5	9,1	9,8	11,1	9,3
			8	9,9	13,0	8,8	9,4	9,6	9,3	9,3	10,6	8,7	9,9	13,0	8,8	9,3	10,6	8,7	9,5	10,1	9,3
			9	9,8	12,3	8,9	10,1	11,1	9,7	9,1	10,3	9,7	9,8	12,3	8,9	9,1	10,3	8,7	9,3	10,1	8,7
			10	9,7	12,5	8,7	10,0	11,2	9,6	9,2	10,2	8,8	9,7	12,5	8,7	9,2	10,2	8,8	9,3	10,8	8,8
			Média	9,99	12,51	9,12	9,80	10,16	9,67	9,39	10,54	9,10	9,99	12,51	9,12	9,39	10,54	9,00	9,54	10,82	9,05
			S,D,	0,34	0,96	0,43	0,21	0,67	0,25	0,28	0,46	0,39	0,34	0,96	0,43	0,28	0,46	0,35	0,21	0,54	0,22
			C,V, (%)	3,36	7,69	4,75	2,19	6,61	2,54	2,99	4,33	4,26	3,36	7,69	4,75	2,99	4,33	3,85	2,21	4,96	2,48
	Porcentagem de Veículos Parados		1	38,6	47,3	35,9	42,1	42,6	41,9	42,3	45,2	41,4	38,6	47,3	35,9	42,3	45,2	41,4	39,9	50,0	36,7
			2	40,7	56,5	35,1	41,5	47,2	39,5	42,2	50,9	39,2	40,7	56,5	35,1	42,2	50,9	39,2	39,3	49,1	35,9
			3	41,4	46,9	39,4	44,0	54,0	40,4	40,8	51,2	37,0	41,4	46,9	39,4	40,8	51,2	37,0	42,1	51,2	38,9
			4	43,7	61,2	37,4	44,5	46,4	43,9	40,3	49,8	36,9	43,7	61,2	37,4	40,3	49,8	36,9	39,4	49,8	35,7
			5	39,5	46,7	37,2	43,1	45,1	42,5	37,7	46,2	34,9	39,5	46,7	37,2	37,7	46,2	34,9	40,7	49,5	37,9
			6	39,5	48,6	36,4	43,8	47,6	42,5	39,0	43,8	37,4	39,5	48,6	36,4	39,0	43,8	37,4	41,8	49,0	39,3
			7	42,3	49,8	39,6	40,1	45,6	38,1	41,6	51,2	38,1	42,3	49,8	39,6	41,6	51,2	38,1	41,8	50,2	38,7
			8	40,9	54,9	35,7	39,7	44,2	38,1	38,4	44,2	36,3	40,9	54,9	35,7	38,4	44,2	36,3	41,1	44,2	39,9
			9	39,3	51,2	35,1	41,9	49,3	39,4	37,7	43,3	35,8	39,3	51,2	35,1	37,7	43,3	35,8	38,0	43,3	36,1
			10	38,2	50,0	34,0	42,3	55,7	37,6	37,8	44,3	35,5	38,2	50,0	34,0	37,8	44,3	35,5	39,2	49,5	35,5
			Média	40,41	51,31	36,58	42,30	47,77	40,39	39,78	47,01	37,25	40,41	51,31	36,58	39,78	47,01	37,25	40,33	48,58	37,46
			S,D,	1,64	4,54	1,74	1,52	3,97	2,09	1,79	3,18	1,83	1,64	4,54	1,74	1,79	3,18	1,83	1,30	2,49	1,58
			C,V, (%)	4,05	8,84	4,77	3,59	8,31	5,17	4,49	6,77	4,92	4,05	8,84	4,77	4,49	6,77	4,92	3,23	5,13	4,22

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume baixo com o método de defuzificação Bissetor

Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
				T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	12,7	9,7	15,7	8,2	7,5	9,0	9,2	7,8	10,7	12,7	9,7	15,7	9,2	7,8	10,7	9,5	7,8	11,3	
		2	13,6	9,8	17,4	8,4	7,5	9,3	9,5	7,9	11,2	13,6	9,8	17,4	9,5	7,9	11,2	9,9	8,0	11,8	
		3	13,5	10,6	16,4	8,2	7,5	8,9	9,3	7,8	10,8	13,5	10,6	16,4	9,3	7,8	10,8	10,0	8,2	11,8	
		4	13,0	9,7	16,5	8,2	7,5	8,9	9,2	7,7	10,7	13,0	9,7	16,5	9,2	7,7	10,7	9,6	8,0	11,2	
		5	12,5	9,5	15,5	8,2	7,5	8,9	9,3	7,8	10,8	12,5	9,5	15,5	9,3	7,8	10,8	9,5	7,9	11,1	
		6	13,2	10,1	16,2	8,3	7,5	9,0	9,3	7,8	10,8	13,2	10,1	16,2	9,3	7,8	10,8	9,8	7,8	11,7	
		7	13,1	10,4	15,8	8,4	7,6	9,2	9,2	7,7	10,8	13,1	10,4	15,8	9,2	7,7	10,8	9,6	8,0	11,1	
		8	12,9	9,7	16,1	8,2	7,6	8,9	9,3	7,9	10,7	12,9	9,7	16,1	9,3	7,9	10,7	9,1	7,9	10,3	
		9	13,7	10,4	17,0	8,3	7,5	9,2	9,2	7,7	10,8	13,7	10,4	17,0	9,2	7,7	10,8	9,4	7,8	11,0	
		10	14,1	10,6	17,5	8,4	7,5	9,2	9,4	7,8	11,1	14,1	10,6	17,5	9,4	7,8	11,1	9,9	7,9	11,8	
		Média	13,23	10,05	16,41	8,28	7,52	9,05	9,29	7,79	10,84	13,23	10,05	16,41	9,29	7,79	10,84	9,63	7,93	11,31	
		S,D,	0,47	0,40	0,66	0,09	0,04	0,15	0,09	0,07	0,16	0,47	0,40	0,66	0,09	0,07	0,16	0,26	0,12	0,46	
		C,V, (%)	3,53	3,96	4,03	1,05	0,53	1,66	1,02	0,90	1,50	3,53	3,96	4,03	1,02	0,90	1,50	2,71	1,50	4,04	
	Tempo Médio de Ciclo	1		37,3	37,4		28,5	28,5		30,5	30,5		37,3	37,4		30,5	30,5		31,1	31,1	
		2		39,3	39,3		29	28,9		31,1	31,1		39,3	39,3		31,1	31,1		31,8	31,8	
		3		39	39		28,4	28,4		30,6	30,6		39	39		30,6	30,6		31,9	31,9	
		4		38	38,1		28,4	28,4		30,4	30,4		38	38,1		30,4	30,4		31,1	31,1	
		5		37	37,1		28,4	28,4		30,6	30,6		37	37,1		30,6	30,6		31	31	
		6		38,3	38,3		28,5	28,5		30,6	30,7		38,3	38,3		30,6	30,7		31,6	31,6	
		7		38,2	38,2		28,8	28,8		30,5	30,5		38,2	38,2		30,5	30,5		31,1	31,2	
		8		37,8	37,7		28,5	28,5		30,6	30,6		37,8	37,7		30,6	30,6		30,3	30,3	
		9		39,4	39,4		28,7	28,7		30,4	30,5		39,4	39,4		30,4	30,5		30,8	30,8	
		10		40,1	40,1		28,7	28,7		30,8	30,8		40,1	40,1		30,8	30,8		31,8	31,8	
		Média		38,44	38,46		28,59	28,58		30,61	30,63		38,44	38,46		30,61	30,63		31,25	31,26	
		S,D,		0,94	0,91		0,19	0,17		0,20	0,19		0,94	0,91		0,20	0,19		0,49	0,49	
		C,V, (%)		2,44	2,38		0,67	0,60		0,64	0,62		2,44	2,38		0,64	0,62		1,56	1,56	

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume alto com o método de defuzzificação COG

Medida			H, S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
				T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio	1	18,9	23,8	17,0	16,3	22,4	13,9	18,5	23,7	16,4	18,9	23,8	17,0	18,4	22,9	16,5	20,3	23,9	18,9	
		2	19,0	24,2	17,0	16,3	22,6	13,8	18,0	23,5	15,7	19,0	24,2	17,0	17,9	23,5	15,7	19,7	23,6	18,1	
		3	18,3	22,1	17,0	15,7	22,9	13,1	17,5	21,0	16,2	18,6	24,5	16,5	17,4	21,1	16,0	19,5	23,1	18,2	
		4	18,2	23,3	16,3	15,6	21,7	13,2	17,9	24,2	15,5	18,2	23,3	16,3	18,3	24,0	16,1	18,5	22,5	17,0	
		5	19,0	23,3	17,5	16,0	21,9	13,8	18,1	25,2	15,5	19,0	23,3	17,5	18,1	23,9	16,0	19,8	23,3	18,5	
		6	18,9	24,2	17,0	15,7	23,7	12,8	18,1	24,4	15,8	18,9	24,2	17,0	18,2	24,8	15,9	20,0	24,7	18,3	
		7	18,7	23,7	16,7	16,0	21,7	13,7	17,7	22,7	15,7	18,7	23,7	16,7	17,6	22,3	15,8	19,6	23,6	18,0	
		8	19,7	24,0	18,1	16,2	22,9	13,7	18,0	22,8	16,2	19,7	24,0	18,1	18,8	24,1	16,8	19,0	21,8	17,9	
		9	19,5	22,6	18,3	16,6	22,8	14,1	19,2	23,4	14,1	19,5	22,6	18,3	19,0	24,1	17,0	19,8	23,2	17,0	
		10	18,4	22,8	16,7	16,0	22,4	13,5	17,4	23,5	15,1	18,4	22,8	16,7	17,9	23,7	15,7	19,8	24,2	15,7	
		Média	18,86	23,40	17,16	16,04	22,50	13,56	18,04	23,44	15,62	18,89	23,64	17,11	18,16	23,44	16,15	19,60	23,39	17,76	
		S,D,	0,46	0,68	0,60	0,30	0,59	0,39	0,49	1,08	0,63	0,43	0,60	0,63	0,47	1,02	0,44	0,49	0,79	0,89	
		C,V, (%)	2,46	2,90	3,48	1,87	2,64	2,84	2,72	4,59	4,02	2,30	2,52	3,67	2,60	4,35	2,70	2,48	3,36	5,01	
	Porcentagem de Veículos Parados	1	53,1	65,9	48,0	48,9	67,3	41,6	52,8	67,8	46,8	53,1	65,9	48,0	52,6	64,9	47,6	54,6	62,9	51,3	
		2	53,2	66,6	47,9	48,4	66,6	41,2	51,8	65,8	46,3	53,2	66,6	47,9	50,8	65,5	44,9	54,0	63,5	50,2	
		3	50,0	57,3	47,4	47,7	70,5	39,6	49,6	59,6	46,0	51,0	63,9	46,5	49,5	60,7	45,6	53,6	58,9	51,7	
		4	50,6	63,1	45,8	47,2	64,6	40,6	51,4	67,6	45,3	50,6	63,1	45,8	52,7	66,9	47,2	52,5	61,9	49,0	
		5	51,8	61,0	48,4	47,5	64,9	41,1	50,5	68,3	43,9	51,8	61,0	48,4	50,4	65,0	45,0	53,5	61,3	50,6	
		6	51,5	63,8	47,1	47,0	69,2	39,1	51,6	67,8	45,9	51,5	63,8	47,1	50,4	66,2	44,8	53,9	65,0	50,0	
		7	51,5	62,3	47,3	48,2	65,5	41,3	50,3	62,5	45,5	51,5	62,3	47,3	50,2	60,7	46,0	53,1	61,0	50,0	
		8	52,9	62,9	49,3	47,3	68,1	39,7	50,7	63,4	46,0	52,9	62,9	49,3	51,8	64,7	47,0	52,1	58,7	49,7	
		9	53,1	60,9	50,0	48,1	66,7	40,6	53,7	63,2	49,8	53,1	60,9	50,0	52,8	65,3	47,7	53,5	62,1	50,0	
		10	51,2	62,1	47,0	47,5	65,6	40,5	49,7	65,1	43,7	51,2	62,1	47,0	51,3	65,7	45,8	54,2	63,1	50,7	
		Média	51,89	62,59	47,82	47,78	66,90	40,53	51,21	65,11	45,92	51,99	63,25	47,73	51,25	64,56	46,16	53,50	61,84	50,32	
		S,D,	1,08	2,50	1,14	0,57	1,81	0,78	1,25	2,74	1,60	0,94	1,79	1,21	1,12	2,03	1,07	0,72	1,87	0,74	
		C,V, (%)	2,08	4,00	2,39	1,19	2,71	1,93	2,45	4,21	3,48	1,81	2,82	2,52	2,18	3,14	2,32	1,35	3,03	1,48	

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume alto com o método de defuzificação COG (continuação)

Medida			Resposta do Controlador																		
			Tabela 1				Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			H, S,	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	32,6	24,2	41,1	25,5	17,0	34,0	31,0	22,4	39,9	32,6	24,2	41,1	30,9	22,3	39,6	35,2	27,4	43,0	
		2	32,1	23,8	40,4	25,4	17,0	33,9	30,5	21,7	39,4	32,1	23,8	40,4	30,0	21,3	38,6	34,6	27,0	42,1	
		3	32,6	23,9	41,4	24,5	14,7	34,0	30,9	21,8	40,0	31,8	22,5	41,0	30,2	21,3	39,1	34,2	25,8	42,5	
		4	32,1	23,7	40,6	24,2	15,9	32,6	30,2	21,6	39,0	32,1	23,7	40,6	30,2	21,8	38,8	34,0	26,4	41,7	
		5	33,0	24,6	41,3	25,0	15,7	34,2	30,0	20,6	39,7	33,0	24,6	41,3	30,2	21,0	39,4	34,7	26,5	42,6	
		6	32,9	24,0	41,6	25,0	15,3	34,5	30,4	21,0	40,0	32,9	24,0	41,6	31,1	22,1	40,3	34,7	26,3	43,2	
		7	32,3	24,1	40,6	24,7	16,4	33,2	31,1	22,7	39,7	32,3	24,1	40,6	30,8	22,4	39,3	34,7	27,2	42,2	
		8	33,8	25,4	42,3	25,5	16,2	34,6	31,3	21,9	40,9	33,8	25,4	42,3	31,3	22,3	40,4	34,8	26,6	43,0	
		9	33,2	25,3	41,2	25,5	16,7	34,3	31,9	23,3	40,5	33,2	25,3	41,2	31,1	22,3	39,9	34,9	27,2	42,6	
		10	32,1	23,7	40,8	24,9	16,2	33,4	29,6	20,6	38,8	32,1	23,7	40,8	29,8	20,6	38,7	34,6	26,8	42,5	
		Média	32,67	24,27	41,13	25,02	16,11	33,87	30,69	21,76	39,79	32,59	24,13	41,09	30,56	21,74	39,41	34,64	26,72	42,54	
		S,D,	0,53	0,60	0,54	0,44	0,70	0,60	0,65	0,84	0,60	0,59	0,80	0,53	0,51	0,61	0,61	0,32	0,47	0,43	
		C,V, (%)	1,63	2,46	1,31	1,74	4,34	1,76	2,10	3,84	1,51	1,82	3,31	1,29	1,66	2,81	1,54	0,92	1,75	1,02	
	Tempo Médio de Ciclo	1		77,3	77,3		63,1	63		74,2	74,3		77,3	77,3		73,7	73,8		82,4	82,2	
		2		76,2	75,9		62,8	62,6		73,1	73		76,2	75,9		71,9	71,9		81,1	80,9	
		3		77,3	77,3		60,7	60,8		73,7	73,8		75,5	75,5		72,2	72,4		80,3	80,3	
		4		76,1	76,3		60,4	60,3		72,5	72,3		76,1	76,3		72,5	72,3		80,1	79,8	
		5		77,8	77,9		61,9	61,9		72,3	72,4		77,8	77,9		72,4	72,4		81,2	81,1	
		6		77,5	77,6		61,9	61,8		72,9	73		77,5	77,6		74,4	74,5		81,4	81,4	
		7		76,8	76,6		61,6	61,6		74,6	74,5		76,8	76,6		73,8	73,7		81,4	81,4	
		8		79,7	79,6		62,8	62,8		74,7	74,7		79,7	79,6		74,8	74,6		81,4	81,7	
		9		78,5	78,3		63	63,1		75,8	76,2		78,5	78,3		74,2	74,5		81,9	81,9	
		10		76,4	76,4		61,6	61,5		71,3	71,4		76,4	76,4		71,3	71,4		81,1	81,3	
		Média		77,36	77,32		61,98	61,94		73,51	73,56		77,18	77,14		73,12	73,15		81,23	81,20	
		S,D,		1,06	1,05		0,90	0,89		1,28	1,34		1,20	1,18		1,14	1,14		0,64	0,69	
		C,V, (%)		1,37	1,36		1,45	1,44		1,74	1,82		1,55	1,53		1,56	1,56		0,79	0,84	

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume médio com o método de defuzificação COG

Medida		H, S	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio	1	14,3	19,3	12,5	12,0	16,7	10,4	13,5	18,3	11,8	14,3	19,3	12,5	13,5	18,0	12,0	16,1	18,7	15,2
		2	14,6	20,0	12,8	12,5	18,3	10,6	14,1	19,3	12,3	14,6	20,0	12,8	13,5	18,7	11,8	15,6	19,0	14,5
		3	14,7	20,8	12,6	12,0	17,8	10,0	14,3	18,4	12,8	14,7	20,8	12,6	14,2	19,9	12,2	16,9	19,7	16,0
		4	14,0	18,5	12,3	12,3	16,9	10,6	13,6	18,4	11,8	14,0	18,5	12,3	13,6	18,3	11,9	15,9	17,4	15,3
		5	14,5	19,1	13,1	12,5	16,9	11,1	13,6	18,5	12,1	14,5	19,1	13,1	14,1	19,7	12,3	16,4	20,5	15,1
		6	14,8	20,4	13,0	12,0	17,6	10,1	13,9	18,2	12,4	14,8	20,4	13,0	13,7	18,2	12,2	16,4	19,4	15,3
		7	14,2	17,9	13,0	11,8	16,6	10,2	13,9	18,4	12,4	14,2	17,9	13,0	13,7	16,9	12,7	16,3	18,9	15,5
		8	14,1	17,7	12,9	11,9	17,6	9,9	13,6	17,0	12,4	14,1	17,7	12,9	13,6	17,2	12,3	16,4	19,2	15,4
		9	15,2	20,2	13,5	12,3	16,8	10,8	14,1	18,5	10,8	15,2	20,2	13,5	13,8	18,5	12,2	16,1	19,7	12,2
		10	13,3	18,8	11,6	11,9	17,0	10,3	12,9	17,4	11,5	13,3	18,8	11,6	12,8	17,0	11,5	16,6	19,9	11,5
		Média	14,37	19,27	12,73	12,12	17,22	10,40	13,75	18,24	12,03	14,37	19,27	12,73	13,65	18,24	12,11	16,27	19,24	14,60
		S,D,	0,49	1,01	0,49	0,24	0,54	0,36	0,38	0,60	0,55	0,49	1,01	0,49	0,36	0,98	0,31	0,35	0,80	1,43
		C,V, (%)	3,44	5,24	3,88	2,01	3,11	3,44	2,76	3,28	4,54	3,44	5,24	3,88	2,65	5,38	2,57	2,13	4,13	9,78
	Porcentagem de Veículos Parados	1	46,2	62,4	40,6	41,9	61,2	35,2	43,4	59,7	37,8	46,2	62,4	40,6	45,1	60,2	39,9	50,8	58,5	48,2
		2	46,0	60,5	41,3	44,0	61,8	38,2	45,6	59,8	40,9	46,0	60,5	41,3	44,4	59,5	39,5	48,6	57,5	45,7
		3	46,1	63,4	40,0	40,7	62,5	33,2	45,9	59,9	41,0	46,1	63,4	40,0	46,2	65,1	39,6	51,4	60,6	48,2
		4	46,3	59,4	41,6	42,1	57,9	36,3	45,0	59,9	39,7	46,3	59,4	41,6	45,1	60,3	39,6	49,3	53,3	47,8
		5	45,5	60,7	40,8	43,0	59,4	37,9	43,6	60,2	38,4	45,5	60,7	40,8	44,9	63,0	39,2	48,8	58,4	45,8
		6	46,0	62,2	40,6	40,9	61,4	34,0	44,2	58,2	39,5	46,0	62,2	40,6	43,7	58,2	38,8	49,6	58,2	46,7
		7	46,2	57,6	42,5	39,2	57,1	33,5	45,3	61,6	40,1	46,2	57,6	42,5	43,8	53,9	40,6	50,4	58,4	47,8
		8	46,4	57,5	42,5	39,4	59,1	32,5	45,1	54,3	41,9	46,4	57,5	42,5	44,6	56,5	40,4	51,4	59,4	48,6
		9	46,7	62,7	41,2	43,4	62,0	37,0	43,9	59,3	38,6	46,7	62,7	41,2	44,1	62,5	37,8	49,7	62,7	45,1
		10	41,4	58,9	35,8	41,4	61,3	35,1	42,3	58,4	37,2	41,4	58,9	35,8	41,9	57,8	36,8	50,8	61,0	47,6
		Média	45,68	60,53	40,69	41,60	60,37	35,29	44,43	59,13	39,51	45,68	60,53	40,69	44,38	59,70	39,22	50,08	58,80	47,15
		S,D,	1,46	2,02	1,80	1,52	1,77	1,90	1,08	1,84	1,43	1,46	2,02	1,80	1,08	3,13	1,10	0,97	2,37	1,17
		C,V, (%)	3,19	3,34	4,43	3,66	2,93	5,40	2,43	3,12	3,63	3,19	3,34	4,43	2,44	5,25	2,81	1,94	4,04	2,48

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume médio com o método de defuzificação COG (continuação)

Medida		H, S	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	23,4	16,2	30,5	16,5	10,5	22,4	22,4	15,1	29,7	23,4	16,2	30,5	22,5	15,6	29,5	27,6	22,6	32,5
		2	24,2	17,1	31,4	16,5	10,2	22,8	23,5	16,4	30,8	24,2	17,1	31,4	22,6	15,5	29,9	28,1	22,7	33,4
		3	24,8	17,1	32,6	16,9	10,6	23,3	23,6	16,5	30,7	24,8	17,1	32,6	22,8	15,3	30,3	28,5	23,0	34,1
		4	23,1	16,3	30,0	15,6	10,5	20,7	20,8	14,5	27,1	23,1	16,3	30,0	21,2	15,0	27,3	27,4	22,8	32,1
		5	25,0	16,9	33,0	16,9	10,6	23,2	23,2	15,5	30,8	25,0	16,9	33,0	22,5	14,8	30,3	28,7	22,7	34,6
		6	24,2	16,5	32,0	16,8	10,2	23,5	22,4	15,7	29,3	24,2	16,5	32,0	22,6	15,7	29,5	28,3	22,8	33,7
		7	24,3	17,0	31,4	16,3	10,2	22,5	22,1	15,1	29,1	24,3	17,0	31,4	22,2	15,7	28,8	27,7	22,4	33,1
		8	24,0	17,3	30,7	17,1	10,8	23,3	22,5	16,0	29,1	24,0	17,3	30,7	23,0	16,3	29,7	28,0	22,7	33,4
		9	24,3	17,0	31,8	16,3	10,4	22,3	22,0	15,0	29,1	24,3	17,0	31,8	22,0	15,3	28,8	27,8	22,6	33,1
		10	23,3	15,9	31,0	15,8	9,5	22,1	22,0	14,9	29,2	23,3	15,9	31,0	22,1	15,2	29,1	27,8	22,4	33,3
		Média	24,06	16,73	31,44	16,47	10,35	22,61	22,45	15,47	29,49	24,06	16,73	31,44	22,35	15,44	29,32	27,99	22,67	33,33
		S,D,	0,59	0,45	0,89	0,46	0,34	0,79	0,79	0,63	1,06	0,59	0,45	0,89	0,48	0,40	0,84	0,39	0,17	0,68
		C,V, (%)	2,47	2,66	2,83	2,81	3,30	3,48	3,52	4,10	3,59	2,47	2,66	2,83	2,16	2,59	2,88	1,40	0,77	2,05
		1		58,5	58,8		44,9	44,9		56,8	56,8		58,5	58,8		57	57,1		67,1	67,2
		2		60,5	60,5		45	45		59,1	59,1		60,5	60,5		57,4	57,5		68,1	68,1
		3		61,8	61,8		45,9	45,9		59,3	59,2		61,8	61,8		57,6	57,5		69,1	69,1
		4		58,2	58,1		43	43,2		53,5	53,5		58,2	58,1		54,3	54,3		66,9	66,9
		5		61,9	61,9		45,9	45,7		58,4	58,3		61,9	61,9		57,1	57,1		69,4	69,3
		6		60,4	60,5		45,7	45,7		57	57,1		60,4	60,5		57,2	57,3		68,3	68,4
		7		60,6	60,4		44,6	44,7		56,2	56,3		60,6	60,4		56,5	56,5		67,5	67,6
		8		59,9	60		46,2	46,2		57,1	57,1		59,9	60		58	58		68,3	68,1
		9		60,7	60,7		44,6	44,7		56,1	56,3		60,7	60,7		56,1	56,3		67,7	67,7
		10		58,9	58,9		43,5	43,6		56,2	56,2		58,9	58,9		56,3	56,4		67,8	67,7
		Média		60,14	60,16		44,93	44,96		56,97	56,99		60,14	60,16		56,75	56,80		68,02	68,01
		S,D,		1,21	1,18		1,00	0,93		1,61	1,58		1,21	1,18		0,99	0,98		0,76	0,73
		C,V, (%)		2,01	1,97		2,23	2,06		2,83	2,77		2,01	1,97		1,74	1,72		1,12	1,07

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume baixo com o método de defuzzificação COG

Medida		H,S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Desempenho do Tráfego	Atraso Médio	1	10,2	12,8	9,3	9,6	10,3	9,3	10,1	11,9	9,5	10,2	12,8	9,3	10,0	11,8	9,4	12,8	13,6	12,6
		2	10,2	14,4	8,8	9,0	9,9	8,7	10,0	14,5	8,4	10,2	14,4	8,8	10,0	14,2	8,6	13,4	13,7	13,4
		3	10,2	12,1	9,5	9,5	10,6	9,2	9,7	11,8	8,9	10,2	12,1	9,5	10,0	12,3	9,1	12,8	13,9	12,5
		4	10,3	14,3	8,9	9,7	11,4	9,1	10,5	14,3	9,2	10,3	14,3	8,9	10,3	14,2	8,9	13,4	14,1	13,1
		5	9,8	12,1	9,1	9,1	10,3	8,7	9,4	11,4	8,7	9,8	12,1	9,1	9,7	10,9	9,3	13,5	13,7	13,4
		6	10,6	13,0	9,8	9,4	9,9	9,2	9,9	12,2	9,1	10,6	13,0	9,8	9,8	11,8	9,0	13,2	13,0	13,2
		7	10,6	13,6	9,5	9,8	11,4	9,2	10,5	12,6	9,7	10,6	13,6	9,5	10,8	12,5	10,1	12,5	13,7	12,1
		8	10,4	13,3	9,4	9,5	10,7	9,1	9,9	12,6	8,9	10,4	13,3	9,4	9,9	13,0	8,8	13,6	12,5	14,0
		9	10,2	13,6	9,0	8,9	10,2	8,4	9,6	12,7	8,4	10,2	13,6	9,0	9,9	12,4	9,0	13,0	13,1	9,0
		10	9,4	12,8	8,2	9,1	10,3	8,7	9,5	13,2	8,2	9,4	12,8	8,2	9,5	12,0	8,7	13,7	12,7	8,7
		Média	10,19	13,20	9,15	9,36	10,50	8,96	9,91	12,72	8,90	10,19	13,20	9,15	9,99	12,51	9,09	13,19	13,40	12,20
		S,D,	0,34	0,76	0,43	0,30	0,51	0,29	0,36	0,97	0,46	0,34	0,76	0,43	0,34	0,99	0,41	0,38	0,51	1,75
		C,V, (%)	3,36	5,75	4,72	3,18	4,86	3,24	3,65	7,64	5,22	3,36	5,75	4,72	3,36	7,94	4,52	2,87	3,81	14,36
	Porcentagem de Veículos Parados	1	40,3	47,9	37,9	41,2	46,3	39,6	41,2	49,5	38,6	40,3	47,9	37,9	40,2	47,3	37,9	45,7	46,8	45,3
		2	40,2	53,3	35,6	37,9	44,4	35,6	40,5	58,4	34,3	40,2	53,3	35,6	40,2	57,5	34,1	48,3	51,9	47,0
		3	40,6	48,4	37,9	41,1	51,6	37,4	39,9	49,3	36,5	40,6	48,4	37,9	41,1	46,9	39,1	46,3	52,1	44,3
		4	40,2	55,5	34,7	41,3	50,7	37,9	43,3	59,8	37,4	40,2	55,5	34,7	43,3	61,7	36,7	48,8	54,1	46,9
		5	39,8	50,0	36,5	38,6	47,3	35,8	38,1	50,5	34,0	39,8	50,0	36,5	39,5	46,7	37,2	48,2	51,6	47,1
		6	40,3	50,0	37,0	38,4	42,3	37,0	39,7	49,5	36,4	40,3	50,0	37,0	39,2	48,1	36,2	45,6	46,6	45,3
		7	41,4	53,0	37,2	41,1	50,2	37,7	41,3	51,6	37,5	41,4	53,0	37,2	42,6	50,7	39,6	46,3	49,8	45,1
		8	42,2	53,4	38,1	40,8	47,6	38,3	40,4	52,4	35,9	42,2	53,4	38,1	40,9	54,9	35,7	51,2	51,0	51,3
		9	39,5	55,7	33,9	37,6	44,3	35,2	38,5	52,2	33,7	39,5	55,7	33,9	39,6	50,7	35,8	46,0	51,2	44,2
		10	36,2	51,9	30,6	37,0	41,9	35,2	38,7	53,3	33,5	36,2	51,9	30,6	37,7	49,0	33,7	49,4	49,5	49,4
		Média	40,07	51,91	35,94	39,50	46,66	36,97	40,16	52,65	35,78	40,07	51,91	35,94	40,43	51,35	36,60	47,58	50,46	46,59
		S,D,	1,49	2,61	2,23	1,65	3,27	1,41	1,48	3,49	1,71	1,49	2,61	2,23	1,56	4,82	1,83	1,79	2,23	2,17
		C,V, (%)	3,71	5,03	6,20	4,19	7,01	3,80	3,68	6,62	4,79	3,71	5,03	6,20	3,85	9,39	5,01	3,76	4,42	4,66

Resultado da simulação dos 6 controladores para o volume baixo com o método de defuzificação COG (continuação)

Medida		H,S,	Tabela 1			Tabela 2			Tabela 3			Tabela 4			Tabela 5			Tabela 6		
			T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2	T	A,1	A,2
Resposta do Controlador	Tempo Médio de Verde	1	15,0	10,9	19,0	9,2	7,7	10,8	12,7	9,8	15,5	15,0	10,9	19,0	12,7	9,8	15,7	22,2	20,7	23,6
		2	15,2	10,7	19,8	9,4	7,8	11,1	13,6	9,8	17,4	15,2	10,7	19,8	13,6	9,9	17,3	22,3	20,9	23,8
		3	14,1	11,0	17,3	9,3	7,8	10,8	13,4	10,3	16,4	14,1	11,0	17,3	13,6	10,4	16,7	22,4	20,9	23,8
		4	14,7	10,7	18,9	9,0	7,8	10,3	13,0	9,8	16,3	14,7	10,7	18,9	13,0	9,6	16,5	22,3	20,8	23,8
		5	14,1	10,7	17,6	9,3	7,7	10,9	12,7	9,5	15,9	14,1	10,7	17,6	12,5	9,5	15,5	22,2	20,8	23,6
		6	15,0	11,2	19,0	9,4	7,9	11,1	13,2	10,1	16,3	15,0	11,2	19,0	13,2	10,1	16,2	22,4	20,9	23,9
		7	14,7	11,1	18,3	9,2	7,8	10,7	13,1	10,2	16,0	14,7	11,1	18,3	13,1	10,4	15,8	22,3	20,9	23,7
		8	13,3	9,9	16,7	9,2	7,9	10,4	12,9	9,5	16,3	13,3	9,9	16,7	12,9	9,7	16,1	22,0	20,8	23,1
		9	14,9	10,8	18,9	9,4	7,8	11,0	13,7	10,1	17,3	14,9	10,8	18,9	13,7	10,3	17,1	22,3	20,8	23,7
		10	14,5	10,3	18,8	9,7	7,9	11,5	13,4	9,7	17,2	14,5	10,3	18,8	14,1	10,6	17,5	22,4	20,9	23,8
		Média	14,55	10,73	18,43	9,31	7,81	10,86	13,17	9,88	16,46	14,55	10,73	18,43	13,24	10,03	16,44	22,28	20,84	23,68
		S,D,	0,54	0,37	0,90	0,18	0,07	0,33	0,33	0,27	0,61	0,54	0,37	0,90	0,47	0,36	0,66	0,12	0,07	0,21
		C,V, (%)	3,74	3,41	4,88	1,89	0,90	3,06	2,54	2,71	3,68	3,74	3,41	4,88	3,58	3,62	4,03	0,52	0,32	0,90
	Tempo Médio de Ciclo	1		41,9	41,9		30,5	30,5		37,3	37,4		41,9	41,9		37,5	37,5		56,3	56,3
		2		42,5	42,6		30,8	30,9		39,3	39,3		42,5	42,6		39,3	39,3		56,7	56,7
		3		40,4	40,3		30,6	30,6		38,7	38,8		40,4	40,3		39,1	39,2		56,7	56,7
		4		41,5	41,6		30,1	30,1		38	38,1		41,5	41,6		38	38,1		56,6	56,6
		5		40,2	40,3		30,6	30,6		37,4	37,4		40,2	40,3		37	37,1		56,4	56,4
		6		42,2	42,2		30,9	30,9		38,3	38,3		42,2	42,2		38,3	38,3		56,8	56,8
		7		41,4	41,3		30,5	30,5		38,1	38,1		41,4	41,3		38,2	38,2		56,7	56,6
		8		38,6	38,6		30,3	30,3		37,8	37,8		38,6	38,6		37,8	37,7		55,9	55,9
		9		41,7	41,7		30,7	30,8		39,4	39,4		41,7	41,7		39,4	39,4		56,5	56,5
		10		41	41		31,3	31,3		38,8	38,8		41	41		40,1	40,1		56,8	56,8
		Média		41,14	41,15		30,63	30,65		38,31	38,34		41,14	41,15		38,47	38,49		56,54	56,53
		S,D,		1,09	1,11		0,31	0,32		0,69	0,68		1,09	1,11		0,92	0,92		0,27	0,26
		C,V, (%)		2,66	2,69		1,02	1,05		1,81	1,78		2,66	2,69		2,39	2,38		0,47	0,46

VALORES DA ANOVA

Resultados da ANOVA para o método Bissetor (valores de “p”)

Variáveis	Volume		
	Alto	Médio	Baixo
AMI	0,00	0,00	0,00
AM01	0,00	0,00	0,00
AM02	0,00	0,00	0,00
PPI	0,00	0,00	0,01
PP01	0,011	0,017	0,035
PP02	0,00	0,00	0,00
TVI	0,00	0,00	0,00
TV01	0,00	0,00	0,00
TV02	0,00	0,00	0,00
TC01	0,00	0,00	0,00
TC02	0,00	0,00	0,00

Resultados da ANOVA para o método COG (valores de “p”)

Variáveis	Volume		
	Alto	Médio	Baixo
AMI	0,00	0,00	0,00
AM01	0,067	0,00	0,00
AM02	0,00	0,00	0,00
PPI	0,00	0,00	0,00
PP01	0,00	0,417	0,00
PP02	0,00	0,00	0,00
TVI	0,00	0,00	0,00
TV01	0,00	0,00	0,00
TV02	0,00	0,00	0,00
TC01	0,00	0,00	0,00
TC02	0,00	0,00	0,00