

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

**ESTUDO PARA APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE**  
**CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY***

**MICHELLE ANDRADE**

**ORIENTADOR: MARIA ALICE P. JACQUES**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TRANSPORTES**

**PUBLICAÇÃO: T.DM-012 A/2004**

**BRASÍLIA / DF: SETEMBRO / 2004**

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

**ESTUDO PARA APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE**  
**CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY***

**MICHELLE ANDRADE**

**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)**

---

**JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI, Ph.D (EESC/USP)**  
**(EXAMINADOR EXTERNO)**

**Data: Brasília/DF, 21 de Setembro de 2004.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ANDRADE, MICHELLE

Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos *Fuzzy*.  
Brasília, 2004.  
xiii, 137p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Transporte, 2004).

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

1 – Controle de Tráfego

2 – Controle Semafórico

3 – Controladores *Fuzzy*

4 – Sistemas Inteligentes

I – ENC/FT/UnB

II – Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, M. (2004). 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.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Michelle Andrade

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos *Fuzzy*.

GRAU/ANO: Mestre/2004.

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

---

Michelle Andrade

Praça do Rosário, 208, Centro – (34) 3246-0046

CEP: 38.440-026 – Araguari/MG – Brasil

## DEDICATÓRIA

*A Deus, à minha mãe, à minha orientadora  
Prof<sup>a</sup> Maria Alice e à memória do amigo  
Rodrigo.*

## AGRADECIMENTOS

À professora e orientadora Maria Alice, pela confiança depositada no meu trabalho, pelo aprendizado proporcionado durante o processo de pesquisa e discussão, e devido ao incentivo transmitido através de palavras e principalmente de seus atos.

Aos professores do mestrado Adelaida, Yaeko e Paulo César, pelos diversos ensinamentos e apoio nos momentos necessários.

À minha mãe, minha avó e meu irmão, que confiaram e me incentivaram todo o tempo. Ao meu pai.

Ao Luiz Cláudio, pelo companheirismo e apoio incondicionais, e pelo compartilhamento de momentos complicados vividos durante a elaboração deste trabalho.

Aos amigos Diógenes e Willer (*Sala 03*) feitos no programa, que são parte deste trabalho e da nova pessoa que me tornei, um muito obrigada. Pela alegria, pelo trabalho, pelos momentos inesquecíveis.

Aos amigos de “antes do mestrado” (!) Zé e Cláudio, que muito contribuíram com este trabalho. À Millena, Cláudia e Paula que acompanharam esse processo!!!

Aos amigos do mestrado Carla, Alessandra, Selma, Ítalo, Juliana e Geisa, pela amizade e companheirismo!!! À Liliane, Luis Cláudio, George, Daliana, Eliesé, Elizângela, Paulo Guerra e André Gustavo (vizinhos), Patrícia, Rodrigo, Denis, Fernanda, Marcelo; e da turma nova, Ednardo, Ricardo, Fred, Anna Paula, Alessandro, Aline, Gil, Leandro, Marianne, Regina, Mônica e Glenda.

Ao Júlio, pela atenção, carinho e disponibilidade sempre que todos precisamos!!

À *todas* as pessoas que de alguma forma participaram deste processo de transformação, *muito obrigada*.

**RESUMO**  
**ESTUDO PARA APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE CONTROLADORES**  
**SEMAFÓRICOS *FUZZY***

Como forma de gerenciar os conflitos do tráfego em interseções, o semáforo é um dos dispositivos mais empregados em áreas urbanas. Ele pode atuar de modo isolado ou de forma coordenada, e ter sua programação definida a partir de dados históricos do tráfego ou responder, em diferentes níveis, às solicitações do tráfego nas aproximações das interseções.

No caso da operação isolada atuada pelo tráfego, diferentes técnicas têm sido empregadas para a definição do direito de passagem dos fluxos conflitantes, isto é, para o cálculo dos tempos dos semáforos. Dentre elas uma das mais recentes é o emprego da lógica *fuzzy*. Essa técnica tem a característica de emular a percepção humana, e a sua utilização no projeto de controladores tem a vantagem de eliminar a necessidade da representação de relações complexas através de modelos matemáticos sofisticados.

No caso de controladores semafóricos, o uso da Lógica *Fuzzy* foi iniciado em 1977 com o trabalho de Pappis e Mamdani. Desde então, diferentes controladores têm sido desenvolvidos e, recentemente, estudos apontam para a vantagem da integração da Lógica *Fuzzy* com outras técnicas de Inteligência Artificial. Neste contexto o presente trabalho tem como objetivo avaliar o impacto de alterações nos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada do controlador semafórico sobre a resposta do controlador e a operação do tráfego. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia para o ajuste dos conjuntos *fuzzy on-line*, intitulada Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, baseada na análise de uma variável relacionada à operação do tráfego: fila final em cada aproximação ao final do tempo vermelho.

A metodologia foi elaborada de modo a permitir a avaliação do impacto do ajuste realizado em dois momentos distintos: ao final de cada extensão, e ao final de cada fase. Um programa computacional foi desenvolvido para permitir a simulação da resposta do controlador e da operação do tráfego sob as duas condições de ajuste. Foram realizados vários testes através dos quais foi verificado que o ajuste *on-line* (nas duas formas consideradas) representa um ganho para a operação do tráfego em comparação à operação do controlador *fuzzy* sem ajuste dos conjuntos *fuzzy*. Além disso, o ajuste ao final de cada extensão proporcionou melhores resultados que o ajuste ao final da fase.

**ABSTRACT**  
**STUDY FOR IMPROVEMENT OF FUZZY TRAFFIC SIGNAL CONTROLLERS**  
**OPERATION**

The traffic light is one of the most used tools in urban areas in order to manage traffic conflicts at intersections. It operates in an isolated or coordinated way and is programmed according to traffic data history or responds at different levels to traffic requests at intersection approaches.

In terms of isolated vehicle-actuated control, different techniques have been applied in defining the right of way in conflicting flows so as to calculate traffic signal timings. One of the most recent techniques has been the use of fuzzy logic. This technique emulates human perception and the advantage of its use in a controller project is that it eliminates the need to represent complex situations through sophisticated mathematical models.

With reference to traffic signal controllers, the use of Fuzzy Logic was initiated in 1977 in Pappis and Mamdani's work. Since then, different controllers have been developed and, recently, studies point to the advantage of integrating Fuzzy Logic with other Artificial Intelligence techniques. Given the above, this present study aims to assess the impact of alterations to fuzzy sets in controller entry variables on controller response as well as on traffic operation. For such, a methodology for adjusting fuzzy sets online was developed. This method is called Dynamic Selection of Fuzzy Plans and is based upon an analysis of a variable related to traffic operation: the final queue at each approach at the end of the red time.

This methodology was elaborated with a view to assessing the impact of the adjustment made at two specific moments: at the end of each extension and at the end of each phase. A computational program was developed in order to allow for simulating controller response and traffic operation under these two adjustment conditions. Through the tests conducted, it was verified that the online adjustment (in the two forms studied) implies a gain in traffic operation in comparison with fuzzy controller operation without adjustments to the fuzzy sets. Further, the adjustment to the end of each extension provided better results than the adjustment made at the end of the phase.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1. APRESENTAÇÃO	1
1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.3. OBJETIVOS	2
1.4. JUSTIFICATIVA	2
1.5. HIPÓTESE	3
1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
<b>2. CONTROLE SEMAFÓRICO</b>	<b>5</b>
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2. SEMÁFORO	5
2.3. CONTROLADOR SEMAFÓRICO	7
2.3.3 Princípio da Extensão	8
2.3.4 Seleção Dinâmica de Planos	9
2.4. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO	10
2.4.1 Estratégias de Controle	11
2.4.2 Forma de Controle	11
2.4.3 Modelos de Controle Semafórico por Demanda de Tráfego	11
2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
<b>3. TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS A CONTROLE</b>	<b>17</b>
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	17
3.2. SISTEMAS INTELIGENTES	17
3.3. LÓGICA <i>FUZZY</i>	19
3.3.1 Principais características da Lógica <i>Fuzzy</i>	20
3.3.2 Conjuntos <i>Fuzzy</i>	20
3.3.3 Diferentes tipos de Incertezas	22
3.3.4 Lógica <i>fuzzy</i> aplicada a controle	23
3.4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS	25
3.4.1. Neurônio Artificial	25
3.4.2. Principais características das Redes Neurais Artificiais	26
3.4.3. Topologias das Redes Neurais	27
3.4.4. Aplicações gerais de Redes Neurais	27
3.5. SISTEMAS HÍBRIDOS	27
3.6. SISTEMAS INTELIGENTES EM CONTROLE DO TRÁFEGO	28
3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
<b>4. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY</b>	<b>30</b>
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
4.2. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS <i>FUZZY</i> DESCRITOS NA LITERATURA	31
4.2.1 Controlador de Pappis e Mamdani	31
4.2.2 Controlador de Chiu	33
4.2.3 Controlador de Kim	34
4.2.4 Controlador de Czogalla	36
4.2.5 Controlador de Favilla ( <i>et al.</i> )	38
4.2.6 Controlador “ <i>Fuzzy-Expert</i> ”	39
4.2.7 Controlador de Trabia ( <i>et al.</i> )	40
4.2.8 Controlador de Niittymäki e Pursula	41



4.3.	ESTUDOS SOBRE A OPERAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS <i>FUZZY</i>	43
4.3.1	Diferentes formas de implementação de conectores <i>fuzzy</i>	43
4.3.2	Impacto de utilização de diferentes métodos de defuzificação aplicados a controladores semafóricos <i>fuzzy</i>	44
4.3.3	Impacto dos conjuntos <i>fuzzy</i> sobre o desempenho dos controladores semafóricos-	45
4.4.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
<b>5.</b>	<b>CONTROLADOR SEMAFÓRICO <i>FUZZY</i> AJUSTÁVEL</b>	<b>47</b>
5.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	47
5.2.	CARACTERIZAÇÃO DO CONTROLADOR <i>FUZZY</i>	47
5.3.	DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O AJUSTE <i>ON-LINE</i>	52
5.4.	PROCESSO DE AJUSTE <i>ON-LINE</i> DOS CONJUNTOS <i>FUZZY</i>	53
5.5.	TESTE DAS FORMAS DE AJUSTE DEFINIDAS	66
5.6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>	<b>77</b>
6.1.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	77
6.2.	CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS E CONSTATAÇÃO DA HIPÓTESE	78
6.3.	PRINCIPAIS CONCLUSÕES	78
6.4.	LIMITAÇÕES DO ESTUDO	79
6.5.	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	79
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	80
	ANEXO A - Tabelas de Extensão <i>Fuzzy</i>	84
	ANEXO B - Relatório do Programa	88
	ANEXO C - Tabelas de Resultados	100
	ANEXO D - Estudos Gráficos	113

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 3.1:</b>	Tipos de Funções de Pertinência _____	22
<b>Tabela 4.1:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Pappis e Mamdani _____	32
<b>Tabela 4.2:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Chiu _____	34
<b>Tabela 4.3:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Czogalla _____	37
<b>Tabela 4.4:</b>	Exemplo de regras do controlador de Czogalla _____	37
<b>Tabela 4.5:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Favilla et al. (1993) _____	39
<b>Tabela 4.6:</b>	Conjuntos <i>Fuzzy</i> , limites e formatos das funções de pertinência do controlador “ <i>fuzzy-expert</i> ” _____	40
<b>Tabela 4.7:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Trabia _____	41
<b>Tabela 4.8:</b>	Conjuntos <i>fuzzy</i> definidos para o controlador de Niittymäki _____	43
<b>Tabela 5.1:</b>	Conjuntos <i>Fuzzy</i> definidos para o controlador base _____	49
<b>Tabela 5.2:</b>	Intervalo e forma das funções de pertinência das variáveis lingüísticas _____	49
<b>Tabela 5.3:</b>	Regras <i>fuzzy</i> utilizadas _____	50
<b>Tabela 5.4:</b>	Relação V/C para limitação da Condição de Tráfego _____	51
<b>Tabela 5.5:</b>	Volumes e Taxas de Chegada das aproximações da interseção estudada _____	51
<b>Tabela 5.6:</b>	Limites dos Conjuntos <i>Fuzzy</i> para as Variáveis Fila e Chegada _____	55
<b>Tabela 5.7:</b>	Planilha de Controle relativa ao Caso 1 _____	56
<b>Tabela 5.8:</b>	Versões desenvolvidas no FORTRAN para simulações _____	60
<b>Tabela 5.9:</b>	Limites de normalização do número randômico _____	62
<b>Tabela 5.10:</b>	Situações iniciais para simulações _____	65
<b>Tabela 5.11:</b>	Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto e Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> _____	66
<b>Tabela 5.12:</b>	Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto e Planos <i>Fuzzy</i> Fixos _____	67
<b>Tabela 5.13:</b>	Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto e Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> _____	69
<b>Tabela 5.14:</b>	Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto e Planos <i>Fuzzy</i> Fixos _____	69
<b>Tabela 5.15:</b>	Resultados estabilizados (para FF) e médios (para FV) de fila e tempo de verde para seleção dinâmica de planos <i>fuzzy</i> _____	71
<b>Tabela 5.16:</b>	Intervalos calculados de minimização de atrasos _____	72
<b>Tabela 5.17:</b>	Ciclos para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> ao final do 15º ciclo _____	73
<b>Tabela 5.18:</b>	Resumo das filas no vermelho para todas as situações ao final do 15º ciclo (para FF) e em valores médios (para FV) _____	74
<b>Tabela 5.19:</b>	Resumo dos tempos de verde para todas as situações ao final do 15º ciclo (para FF) e em valores médios (para FV) _____	74
<b>Tabela A.1</b>	Planilha de Controle relativa ao Caso 1 _____	85
<b>Tabela A.2</b>	Planilha de Controle relativa ao Caso 4 _____	86
<b>Tabela A.3</b>	Planilha de Controle relativa ao Caso 7 _____	87
<b>Tabela C.1</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Fixo _____	101
<b>Tabela C.2</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Fixo _____	102
<b>Tabela C.3</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Fixo _____	103
<b>Tabela C.4</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Fixo _____	104

<b>Tabela C.5</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Fixo	105
<b>Tabela C.6</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Fixo	106
<b>Tabela C.7</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Variável	107
<b>Tabela C.8</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Variável	108
<b>Tabela C.9</b>	Resultados de Simulação para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Variável	109
<b>Tabela C.10</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Variável	110
<b>Tabela C.11</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Variável	111
<b>Tabela C.12</b>	Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Variável	112

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1:</b>	Esquema de intervalos de fase atuados (adaptado de Kell e Fullerton, 1991, McShane e Roess, 1990 e Niittymäki, 1998)	09
<b>Figura 2.2:</b>	Arranjo longitudinal padrão dos detectores de tráfego (Kronborg, 1992)	12
<b>Figura 2.3:</b>	Disposição transversal dos detectores de tráfego (Kronborg, 1992)	13
<b>Figura 2.4:</b>	Estrutura típica de detectores do modelo LHOVRA (Kronborg, 1992)	14
<b>Figura 3.1:</b>	Estrutura organizacional da Inteligência Artificial	18
<b>Figura 3.2:</b>	Diagrama de um controlador <i>fuzzy</i> (Fonte: Niittymäki, 1998)	23
<b>Figura 3.3:</b>	Neurônio artificial projetado por McCulloch (Fonte: Tatibana e Kaetsu, 2000)	25
<b>Figura 3.4:</b>	Estrutura básica de uma Rede Neural (Fonte: Tatibana e Kaetsu, 2000)	26
<b>Figura 5.1:</b>	Superfície de Controle	50
<b>Figura 5.2;</b>	Fluxograma de Controle para ajuste ao final da Fase	58
<b>Figura 5.3:</b>	Fluxograma de Controle para ajuste ao final da Extensão	59
<b>Figura 5.4:</b>	Fluxograma de Controle com apenas uma tabela	61
<b>Figura 5.5:</b>	Fragmento do Relatório de Simulação da versão SIMULA_Ffffase_	64
<b>Figura 5.6:</b>	Arquivo de saída numérico (Medidas.txt)	65
<b>Figura 5.7:</b>	Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto, Via Principal, $Q_i=15$	68
<b>Figura 5.8:</b>	Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto, Via Principal, $Q_i=15$	70
<b>Figura D.1:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Fixo	114
<b>Figura D.2:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Fixo	115
<b>Figura D.3:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Fixo	116
<b>Figura D.4:</b>	Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Fixo	117
<b>Figura D.5:</b>	Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Fixo	118
<b>Figura D.6:</b>	Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Fixo	119
<b>Figura D.7:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Variável	120
<b>Figura D.8:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Variável	121
<b>Figura D.9:</b>	Gráfico de Fila para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Variável	122
<b>Figura D.10:</b>	Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Variável	123
<b>Figura D.11:</b>	Gráficos de Fila para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Variável	124
<b>Figura D.12:</b>	Gráficos de Filas para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Variável	125

<b>Figura D.13:</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Fixo	126
<b>Figura D.14:</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Fixo	127
<b>Figura D.15:</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Fixo	128
<b>Figura D.16:</b>	Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Fixo	129
<b>Figura D.17</b>	Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Fixo	130
<b>Figura D.18</b>	Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Fixo	131
<b>Figura D.19</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Baixo e Fluxo Variável	132
<b>Figura D.20:</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Médio e Fluxo Variável	133
<b>Figura D.21:</b>	Tempo de Verde para Controle Semafórico <i>Fuzzy</i> convencional, Volume Alto e Fluxo Variável	134
<b>Figura D.22:</b>	Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Baixo e Fluxo Variável	135
<b>Figura D.23:</b>	Tempo de Verde Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Médio e Fluxo Variável	136
<b>Figura D.24:</b>	Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos <i>Fuzzy</i> , Volume Alto e Fluxo Variável	137

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. APRESENTAÇÃO

Existem no sistema de tráfego freqüentes situações que exigem a presença de algum dispositivo de controle para o gerenciamento dos conflitos entre veículos e/ou veículos e pedestres. Os semáforos atuam neste sentido de diferentes maneiras, dependendo das características do tráfego e da via. Isto é, ele pode ser programado para operar de forma isolada ou em rede com os semáforos das interseções adjacentes. Este controle pode também responder às condições reais do tráfego – operação atuada – ou ser programado a partir de dados históricos das condições de tráfego no local – operação em tempo fixo. A importância de um controle atuado pelo tráfego é verificada, em especial, para locais onde existe brusca variação temporal do fluxo de tráfego – horas de pico e entre-picos e flutuações acentuadas do volume de tráfego nas horas de entre-picos.

Estudos têm mostrado que o uso da lógica *fuzzy* para o controle semaforico atuado pelo tráfego é vantajoso em diversas situações. Em geral, os controladores *fuzzy* apresentados na literatura mantêm as suas condições de controle inalteradas, especificamente no que diz respeito às definições dos conjuntos *fuzzy* da base de regras empregados na definição da duração das extensões do tempo de verde. Estas extensões a serem concedidas pelo controlador à corrente de tráfego que está sendo servida são definidas a partir das variáveis lingüísticas de entrada e saída e das regras que definem as relações entre as mesmas.

São conhecidas diversas aplicações da associação da lógica *fuzzy* com técnicas que permitem a definição/ajuste dos componentes dos controladores, sobretudo dos conjuntos *fuzzy* e da base de regras, com vistas a melhorar o seu desempenho. No que diz respeito aos controladores semaforicos *fuzzy*, os estudos para o uso associado da lógica *fuzzy* a outras técnicas (redes neurais, algoritmos genéticos, etc.) estão apenas começando. Assim, a realização de trabalhos voltados ao desenvolvimento de controladores semaforicos *fuzzy* com parâmetros ajustáveis de forma *on-line* poderá contribuir para a evolução dos atuais sistemas de controle de tráfego.

## 1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os controladores semaforicos *fuzzy* utilizam base de dados e de regras extraídas de um especialista para realizar a inferência e responder às solicitações do tráfego junto a

interseções. Esses parâmetros devem refletir, o melhor possível, a percepção de um controlador humano no que diz respeito à classificação das variáveis utilizadas no processo de decisão. Por exemplo, uma fila de dez carros aguardando no vermelho é grande, média ou pequena? Como esta avaliação é sempre feita de modo contextualizado é de se esperar que ela varie ao longo do dia, especialmente em função da variação do fluxo de tráfego nas interseções (horário de pico e entre-picos). No entanto, nos controladores *fuzzy*, esses elementos mantêm-se, em geral, inalterados diante de diferentes situações de tráfego. Como permitir que o controlador *fuzzy* ajuste automaticamente seus parâmetros em resposta às variações das condições do tráfego?

### **1.3. OBJETIVOS**

O objetivo geral do trabalho é determinar um procedimento para o ajuste *on-line* dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* relacionados às variáveis de entrada de um controlador semafórico.

Como objetivos específicos, são propostos:

- Estudar o impacto direto de alterações nos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* de entrada sobre a resposta do controlador e operação do tráfego.
- Propor alternativas para o ajuste “*on-line*” dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada de um controlador.
- Definir as variáveis de controle que devem ser utilizadas pelo modelo de controle para avaliar a necessidade de ajuste dos conjuntos *fuzzy*.
- Identificar um modelo *fuzzy* adaptativo que possa ser utilizado para o desenvolvimento de controladores semafóricos.

### **1.4. JUSTIFICATIVA**

Diante da atual conjuntura do trânsito nos grandes centros busca-se, cada vez mais, formas alternativas de controle de tráfego. Deve-se ter a percepção, no entanto, que diante de uma situação de tráfego saturada não existem muitas opções de controle para reverter o problema dos congestionamentos. Na verdade, os sistemas de controle visam minimizar os efeitos adversos dos congestionamentos nas horas de pico, e promover a fluidez do tráfego nos entre-picos. Eles objetivam, também, promover a segurança dos usuários das vias em todos os períodos, dentre outros propósitos que podem ser definidos para cada local.

Alguns sistemas de controle adotados, como controladores semafóricos de tempo fixo, são ajustados com base em dados históricos, trabalhando com valores médios do fluxo de tráfego nos horários de pico e entre-pico. Assim, podem ocorrer nos horários de entre-pico situações em que o fluxo é muito prejudicado diante de controles como o mencionado (Reis, 2001). Surgiu, então, a necessidade de desenvolver formas alternativas de controle que respondessem melhor às diferentes situações de tráfego presentes nos sistemas.

Atualmente, existem diferentes tipos de controle visando a interação do controlador semafórico com o sistema controlado. Desde modelos simples como controladores atuados e semi-atuados, até tecnologias mais recentes como controladores *fuzzy*, que têm mostrado grande potencial para a obtenção do resultado esperado.

No entanto, os controladores semafóricos *fuzzy* mantêm, em geral, seus parâmetros iniciais constantes diante de diferentes situações de tráfego, particularmente os relacionados aos conjuntos *fuzzy* associados aos seus dados de entrada e saída, os quais são extraídos de especialistas. Assim, o ajuste “*on-line*” dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* de entrada em função do tráfego prevalecente no local deverá melhorar o desempenho do controlador semafórico *fuzzy*. Estudos anteriores mostram, por exemplo, que o ajuste somente dos conjuntos *fuzzy* de saída produzem filas médias menores de que as resultantes da operação de um controlador *fuzzy* não ajustável (Favilla *et al.* 1992; 1993).

## **1.5. HIPÓTESE**

O ajuste *on-line* dos parâmetros iniciais dos conjuntos *fuzzy* de entrada, utilizados no controle semafórico em resposta às variações das condições de tráfego, melhoram o desempenho do controlador.

## **1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

A dissertação está estruturada em seis capítulos, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1 é dada uma visão geral do problema tratado a fim de justificar o presente estudo. São apresentados os objetivos, as justificativas e a hipótese da pesquisa, sendo finalizado com a descrição do assunto constante de cada capítulo da dissertação.



Os Capítulos 2, 3 e 4, são a estrutura teórica de embasamento da pesquisa apresentada. O Capítulo 2 apresenta os mecanismos e objetivos do controle de tráfego quando são utilizados os semáforos como instrumento de controle.

No Capítulo 3 são apresentadas as principais técnicas de inteligência artificial em uso, enfocando as aplicações na área de transportes e, mais especificamente, em controle semafórico. Sendo assim, são apresentados conceitos e aplicações de lógica *fuzzy*, redes neurais artificiais, e de sistemas *neurofuzzy*.

No Capítulo 4 é feita uma revisão específica acerca de controle semafórico *fuzzy*. Nele são apresentados os principais estudos realizados, a fim de identificar as possibilidades de aperfeiçoamento desta tecnologia.

O Capítulo 5 apresenta os modelos idealizados de ajuste do controlador semafórico *fuzzy*, bem como os testes realizados e análises acerca da proposta apresentada. Para chegar a esta proposta foram determinadas as variáveis de controle e definido um esquema geral de operação para um controlador. O processo de simulação utilizado foi viabilizado a partir do uso do software MatLAB<sup>®</sup> e de programas computacionais desenvolvidos pela pesquisadora, operando sobre dados hipotéticos.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa realizada, bem como os problemas e as limitações encontradas no desenvolvimento do trabalho. Por fim, são apresentadas recomendações para trabalhos futuros.

## **2. CONTROLE SEMAFÓRICO**

É apresentada neste capítulo uma revisão sobre controle semafórico e os elementos que o compõem. Sendo assim, são expostas noções básicas de controle de tráfego, controle semafórico, bem como dos equipamentos utilizados para a realização deste.

### **2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Ruas e avenidas são o meio físico da circulação do trânsito em uma cidade. Normalmente, num cruzamento entre duas ou mais vias existem veículos e pedestres cujos movimentos são conflitantes entre si, ou seja, não podem ser realizados simultaneamente. Assim, torna-se necessário estabelecer normas de controle de direito de passagem que são aplicadas por meio de diferentes tipos de intervenção no tráfego - dentre eles tem-se o semáforo que é um instrumento amplamente utilizado em áreas urbanas (DENATRAN, 1984). Se a aplicação do semáforo for justificada, dependendo da qualidade de sua programação, ele pode ser um dos instrumentos mais eficazes para o controle de tráfego numa interseção (Niittymäki, 1998).

O crescente número de veículos em circulação nas vias urbanas (DENATRAN, 2004) contribui para a ocorrência de situações de risco e desconforto aos habitantes dos centros urbanos, tais como congestionamentos, poluição sonora e atmosférica, acidentes, dentre outros. Diante do exposto, vê-se a necessidade de buscar mecanismos que otimizem o controle do tráfego, principalmente em se tratando de semáforos, pois é um equipamento que permite a implementação de inovações tecnológicas.

### **2.2. SEMÁFORO**

Conforme a definição do DENATRAN (1984), os semáforos são dispositivos de controle de tráfego, os quais, através de indicações luminosas alternam o direito de passagem de motoristas e pedestres nas interseções das vias. São compostos de focos luminosos agrupados e afixados junto às vias.

De acordo com Homburger *et al.* (1996), os semáforos quando convenientemente justificados, corretamente projetados e efetivamente operados, podem realizar as seguintes tarefas:

- ordenar o movimento de tráfego através do controle do direito de passagem;
- providenciar o fluxo progressivo (onda verde) para o fluxo de tráfego de determinada rota;

- interromper o fluxo de tráfego da via principal, para permitir a travessia de pedestres e/ou o acesso ou cruzamento por parte dos veículos das vias secundárias;
- maximizar a capacidade da interseção;
- reduzir a ocorrência de determinados tipos de acidentes.

No entanto, quando implantados de forma inadequada ou não justificados, os semáforos podem resultar em:

- aumento da frequência determinados tipos de acidentes;
- aumento do tempo perdido para atravessar a interseção e de consumo de combustível;
- irritabilidade do motorista;
- desrespeito às indicações do semáforo;
- modificação das rotas, buscando evitar os semáforos.

O dimensionamento de um semáforo consiste do desenvolvimento de “planos semafóricos” que efetuem, da melhor maneira possível, o controle do fluxo de veículos na interseção, segundo um critério estabelecido como, por exemplo, reduzir ao mínimo possível o atraso dos veículos.

O plano semafórico de uma rede de semáforos é constituído basicamente de quatro elementos, que são: fase, ciclo, intervalo e *offset* (defasagem), os quais são detalhados a seguir, seguindo a terminologia americana (Kell e Fullerton, 1991):

- **Fase:** é o intervalo de tempo de cada indicação, ou seja, é a porção de tempo durante o qual os movimentos que recebem o direito de prosseguir durante o verde são constantes, incluindo o tempo de verde e o período de entre verdes que o segue.
- **Ciclo:** é o intervalo de tempo durante o qual todos os movimentos de uma interseção semaforizadas são acomodados. Um ciclo corresponde à seqüência completa das indicações de um semáforo, ou seja, uma seqüência de fases.
- **Intervalo:** é uma porção do ciclo durante a qual a indicação do semáforo é constante.
- **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 compõe o sistema. O *offset* de um semáforo relativo a outro é definido como o intervalo de tempo entre os seus inícios do tempo de verde para a mesma corrente de tráfego. Ou seja, é o retardo

entre o início do sinal verde das interseções a montante e a jusante (Carvalho e Siqueira Neto, 2000, e DENATRAN, 1984).

### 2.3. CONTROLADOR SEMAFÓRICO

Controlador semafórico é 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” (DENATRAN, 1984). Atualmente utilizam-se controladores automáticos que podem operar de diferentes formas, de acordo com o tipo de equipamento utilizado.

Os controladores semafóricos são classificados em dois tipos básicos: controlador de **tempo fixo** e **controlador atuado**, que engloba os controladores tipo semi-atuado, totalmente atuado, e volume-densidade (*volume-density modes*) (Kell e Fullerton, 1991).

#### 2.3.1 Controladores semafóricos de tempo fixo

Este é o tipo mais comum de controlador, o qual opera de acordo com programações pré-determinadas de tempo, ou seja, o tempo de ciclo é constante, e os instantes de mudança das fases ou estágios são fixos em relação ao ciclo. A determinação destes parâmetros é feita em função das características e volumes médios do tráfego do cruzamento em questão (Kell e Fullerton, 1991 e DENATRAN, 1984).

Os controladores de tempo fixo apresentam uma certa flexibilidade de programação, pois modificando adequadamente os tempos pode-se definir comprimentos de ciclo, intervalos de tempo e *offsets* (defasagens) mais adequados para cada caso. Os planos semafóricos são selecionados para operar de acordo com uma demanda definida que pode variar de acordo com a hora do dia ou do dia da semana, de forma geral (Kell e Fullerton, 1991). (falar da seleção dinâmica de planos).

#### 2.3.2 Controladores semafóricos atuados pelo tráfego

Os controladores semafóricos atuados operam em resposta às modificações ocorridas no ambiente de controle, ou seja, os intervalos de fase dependem do volume de tráfego veicular e/ou da presença de pedestres. As informações do ambiente controlado são captadas por detectores de tráfego alocados estrategicamente nas vias ou através das botoeiras de detecção de presença de pedestres. Estas informações são transmitidas para o controlador o qual

processa as informações de acordo com a estratégia de controle para a qual foi programado, e responde ao sistema mediante a sinalização semafórica.

Os controladores por demanda de tráfego são mais complexos que os de tempo fixo, por serem providos de detectores de veículos e lógica de decisão; sua finalidade básica é dar o tempo de verde a cada corrente de tráfego de acordo com a sua necessidade, ajustando-se dinamicamente às flutuações de tráfego que podem ocorrer num cruzamento.

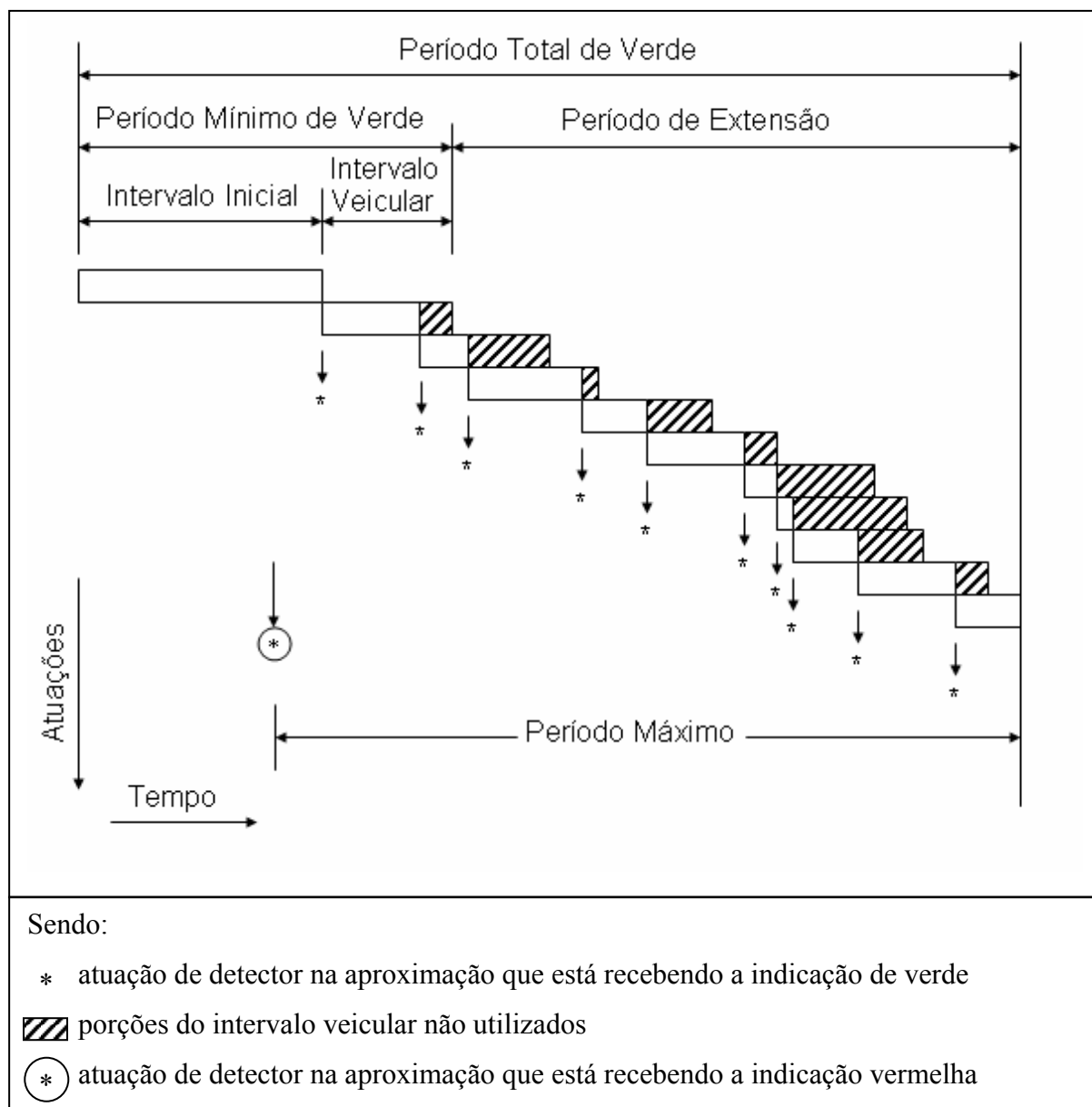
Existem três formas de controle atuado que foram idealizadas para atender a diferentes condições de controle, são elas: semi-atuado, totalmente atuado e volume-densidade (Kell e Fullerton, 1991).

### 2.3.3 Princípio da Extensão

O princípio da extensão é amplamente aplicado às estratégias de controle atuado. De acordo com Kell e Fullerton (1991), são considerados, normalmente, três parâmetros de tempo (Figura 2.1):

- **Período Mínimo de Verde** – tempo mínimo requerido para atender com segurança a pelo menos um veículo. Esse período é formado pela soma dos tempos do intervalo inicial e do intervalo veicular.
- **Intervalo Veicular** – consiste no intervalo máximo de tempo entre atuações sucessivas que permite que o verde seja mantido. O intervalo veicular é contado após cada detecção.
- **Período de Máximo** – intervalo máximo de tempo que o verde pode ser mantido, contado a partir da atuação na aproximação que está recebendo o vermelho.

Assim, o intervalo inicial mais um intervalo veicular compreende o tempo mínimo de verde para um único veículo. Se outros veículos são detectados durante o intervalo veicular, o tempo correspondente a um novo intervalo veicular será dado. Este processo repete-se 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.



**Figura 2.1** – Esquema de intervalos de fase atuados (adaptado de Kell e Fullerton, 1991, McShane e Roess, 1990 e Niittymäki, 1998)

### 2.3.4 Seleção Dinâmica de Planos

A seleção dinâmica de planos é uma técnica de controle semafórico computadorizado, geralmente identificada na literatura (ITE, 1992; Euler, 1987) como Controle de Primeira Geração (*First-Generation Control* – 1-GC), a qual utiliza uma biblioteca de planos semafóricos pré-definidos mediante a aplicação de otimizadores *off-line* sobre dados históricos (p.ex. TRANSYT). Os planos da biblioteca são selecionados de acordo com a hora do dia, ou em resposta às condições do tráfego (controle responsivo).

No controle tipo responsivo, os planos semaforicos pré-determinados ficam armazenados e o sistema seleciona o plano mais adequado à condição de tráfego verificada no intervalo de tempo considerado (geralmente 15 minutos). Esta avaliação é normalmente baseada em medidas de ocupação da via ou de volume de tráfego (Euler, 1987), ou ainda baseada na comparação dos valores de volume de tráfego observados no período com os valores que geraram os planos da biblioteca (McShane e Roess, 1990).

#### **2.4. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO**

Um sistema é definido como uma combinação ou arranjo de entidades, pessoas ou máquinas, que compõem um conjunto e interagem entre si com um objetivo comum (Law e Kelton, 1991). Um sistema não é necessariamente limitado fisicamente, ou seja, este conceito pode ser ampliado para o abstrato e fenômenos dinâmicos tais como encontrados em áreas de conhecimento como a economia. Sendo assim a palavra “sistema” pode ser empregada para representar uma estrutura interativa física, biológica, ou econômica, dentre outras (Ogata, 1970).

Segundo Homburger *et al.* (1996), o conceito de sistema está relacionado com controle semaforico, no sentido de que ele é constituído de métodos, equipamentos e técnicas para coordenar os semaforos e controlar o fluxo de tráfego ao longo de uma via arterial ou sobre uma área controlada.

O principal objetivo de um sistema semaforico é controlar os movimentos conflitantes, permitindo a fluidez do tráfego e buscando minimizar os atrasos de vias arteriais e principais da área controlada. Outros objetivos podem e têm sido muitas vezes agregados, tais como: reduzir o consumo de combustível e a emissão de poluentes; propiciar a travessia segura de pedestres; priorizar a circulação de veículos de transporte público, etc.

O processo de controle envolve as etapas de determinação/seleção, implementação e monitoramento de planos de operação adequados. Basicamente o sistema de controle de tráfego define o plano semaforico mais apropriado para cada interseção em termos de necessidades individuais, como também atua de forma a interconectar controladores isolados definindo o melhor arranjo para a operação em rede (Homburger *et al.*, 1996).

### **2.4.1 Estratégias de Controle**

O controle de tráfego, juntamente com o semáforo, é o meio pelo qual se efetua o controle dos movimentos dos veículos no sistema viário. O tipo de controle implementado é função da estratégia de controle adotada para o local. De acordo com o DENATRAN (1984), existem três categorias básicas de políticas de controle:

- **Interseção isolada**

O controle dos movimentos de tráfego baseia-se apenas nos volumes de veículos existentes no cruzamento, não sendo consideradas as eventuais influências exercidas pela operação de interseções adjacentes.

- **Em rede aberta (controle arterial)**

Este tipo de controle preocupa-se em operar os semáforos de uma via principal (corredor) de forma a dar continuidade de movimentos entre as interseções adjacentes.

- **Em rede fechada (controle em área)**

Neste tipo de controle, são consideradas todas as interseções sinalizadas de uma determinada região. Um exemplo típico é o controle dos semáforos em áreas centrais de grandes cidades.

### **2.4.2 Forma de Controle**

Independente da estratégia de controle adotada existem duas formas de controle para a sua implementação (DENATRAN, 1984): controle por tempo fixo e controle por demanda de tráfego, sendo que este último requer o uso de controladores atuados (ver seção 2.3.2).

Para ambas as formas de controle existem modelos de controle semafórico consagrados, os quais são importantes para a análise do estado da arte de controle semafórico. No entanto, como o objetivo deste trabalho é baseado no controle atuado pelo tráfego, alguns modelos de controle semafórico por demanda de tráfego, como MOVA, LHOVRA, SCOOT, SOS e SCATS, serão tratados no próximo item.

### **2.4.3 Modelos de Controle Semafórico por Demanda de Tráfego**

Para as duas formas gerais de controle referidas na seção anterior, existem diversos modelos. No que diz respeito ao controle semafórico por demanda de tráfego (responsivo ao tráfego), objeto de interesse da presente dissertação, diversos modelos são referidos na literatura. Existem diferentes modelos para uma das estratégias de controle referidas na seção 2.4.1.



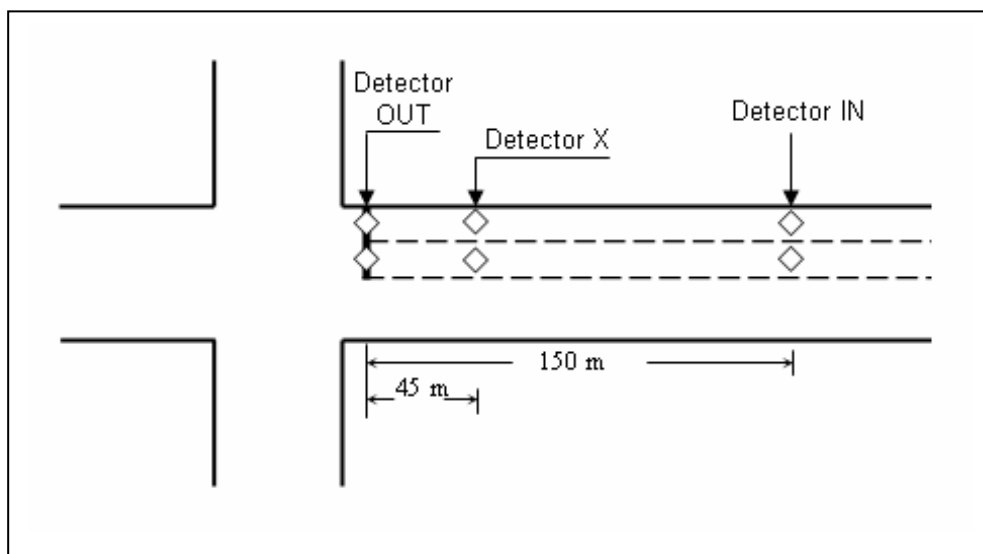
Esses modelos promovem o controle do tráfego usando desde simples heurísticas (como é o caso dos sistemas que adotam o princípio clássico da extensão), até técnicas mais elaboradas como as de otimização e de inteligência artificial.

Nessa seção serão brevemente introduzidos alguns dos modelos que utilizam técnicas de otimização para a determinação dos elementos do plano semaforico. Nos Capítulos 3 e 4 são apresentados alguns aspectos e modelos de controle por demanda de tráfego que usam técnicas de inteligência artificial.

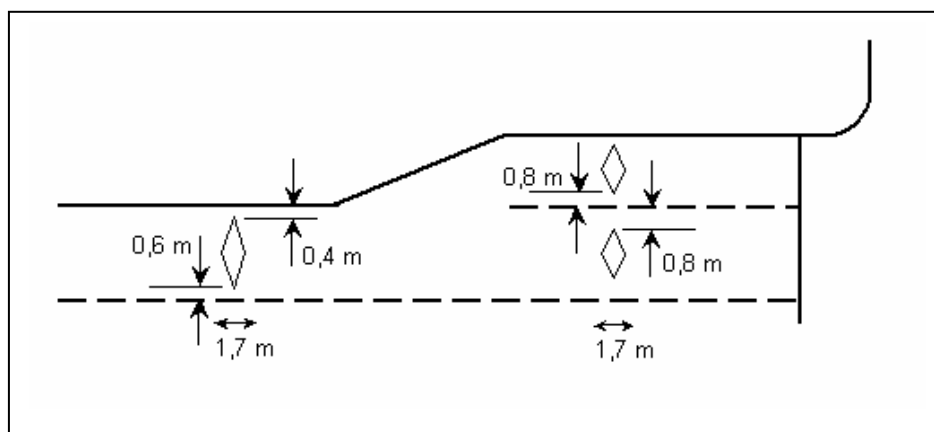
a) *MOVA*

O *MOVA* (*Microprocessor Optimised Vehicle Actuation*) é uma estratégia de controle semaforico pesquisada e desenvolvida entre 1982 e 1988 na Inglaterra pela *Transport and Road Research Laboratory* – TRRL. Este modelo tem o objetivo principal de promover um controle mais flexível para as interseções isoladas do que o apresentado pelo controle tipo fixo (Rochester, 1991).

Os detectores utilizados no *MOVA* têm a forma triangular, e são classificados de acordo com o posicionamento na via em três tipos: *IN*, *X* e *OUT*, os quais são posicionados respectivamente a 150, 45 e 0 metros da linha de retenção (Figura 2.2), considerando uma via regulamentada para 70 km/h. 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, como pode ser observado na Figura 2.3.



**Figura 2.2** – Arranjo longitudinal padrão dos detectores de tráfego (Kronborg, 1992)



**Figura 2.3** – Disposição transversal dos detectores de tráfego (Kronborg, 1992)

Os dados provenientes dos detectores de tráfego são analisados em tempo real por um microprocessador que executa o programa de controle MOVA. A duração dos tempos de verdes é controlada buscando, principalmente, a minimização dos atrasos e do número de paradas e, em caso de ocorrência de saturação da aproximação, ele age no sentido de maximizar a capacidade (Rochester, 1991).

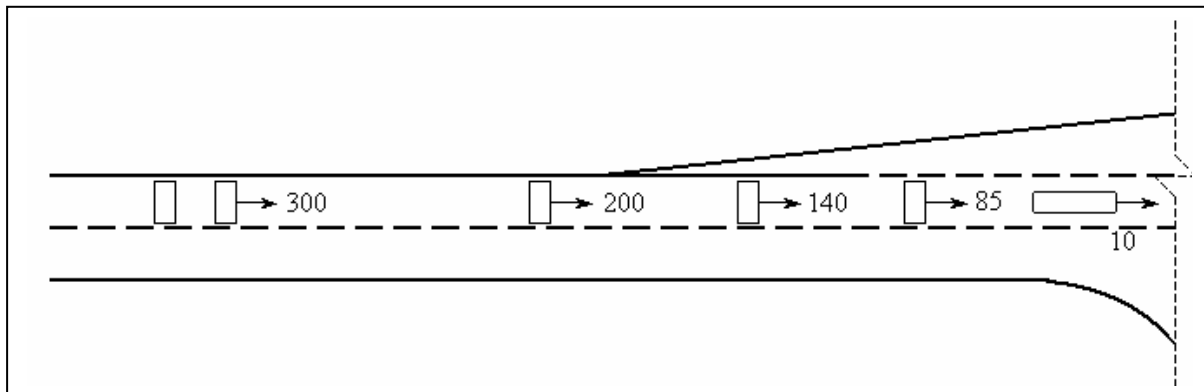
Segundo Kronborg (1992), a estratégia de controle do MOVA é uma mistura de otimização matemática e algoritmo heurístico, que decide pela continuidade do verde ou pela mudança para o vermelho.

#### *b) LHOVRA*

LHOVRA é uma filosofia sueca de controle semaforico, o qual trabalha a suposição básica de promover priorizações, permitindo que caminhões e ônibus cruzem as interseções controladas semaforicamente, praticamente sem parar. No entanto, a utilização deste modelo de controle não implica na eliminação das paradas, mas numa redução substancial destas quando comparadas com outras modalidades de controle semaforico (Kronborg, 1992).

O sistema LHOVRA é baseado numa estrutura pré-definida de detectores de tráfego afixados sobre um trecho da via localizados à 300 metros da interseção controlada (ZIR, 2004). Este sistema, portanto, é estruturado para identificar qualquer veículo pesado que cruza a linha de 300 m da interseção, a fim de promover o controle do tráfego. A passagem do veículo é

monitorada ao longo do trecho de controle através dos detectores localizados respectivamente a 200 – 140 – 85 – (30 – 10) metros da interseção, como estão representados na Figura 2.3.



**Figura 2.4** – Estrutura típica de detectores do modelo LHOVRA (Kronborg, 1992)

O LHOVRA é composto por sete funções, nomeadas de acordo com as letras que formam seu nome (LHOVRA). São elas (Kronborg, 1992; ZIR, 2004):

- 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.

### c) *SCOOT*

O *SCOOT* (*Split, Cycle and Offset Optimization Technique*) é uma ferramenta para gerenciamento e controle de tráfego em áreas urbanas. É um sistema adaptável que responde automaticamente às flutuações no tráfego através do uso de detectores fixados nas vias (Jayakrishnan *et al.*, 2000). Esta ferramenta foi desenvolvida pela *Transport and Road Research Laboratory* (TRRL) no Reino Unido para operar com sistemas semafóricos em vez de realizar controle isolado. Como destacado em *SCOOT-UTC* (2001), o modelo *SCOOT* é amplamente empregado na Grã-Bretanha.

O sistema *SCOOT* é baseado no modelo do *TRANSYT* e usa o mesmo fluxo de tráfego para modelar o sistema. Este é um modelo de estado estacionário do fluxo de tráfego na rede que utiliza equações de dispersão de pelotões. O objetivo preliminar é minimizar os comprimentos

da fila e o atraso na área de interesse. Em redes mais extensas, o SCOOT opera sobre sub-áreas bem definidas com o propósito de modelagem e otimização (SCOOT-UTC, 2001).

#### *d) SOS*

O *Self Optimized Signal* (SOS) é uma estratégia de controle para interseções isoladas desenvolvida a partir de 1992, que combina características de controles por grupos de sinais, como o LHOVRA, com otimização matemática (Kronborg, 1992). A razão para iniciar os estudos sobre uma estrutura pronta, no caso, o LHOVRA, foi devido ao desejo de otimizar matematicamente as características bem representadas neste sistema, tais como, a flexibilidade e a segurança (Kronborg *et al*, 1997).

Sendo assim, o SOS pode ser definido como um sistema sofisticado de identificação e controle de tráfego que permite a mudança no sentido dos movimentos do tráfego a fim de avaliar e minimizar os riscos de segurança para o tráfego nas aproximações que serão paradas. Funciona 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. O objetivo é reduzir colisões traseiras e 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 (Tignor, 1999).

#### *e) SCATS*

O SCATS - *Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System*, é um método de controle de tráfego urbano responsivo desenvolvido na Austrália. Trata-se de um sistema completo de hardware, software e uma filosofia de controle, que opera em tempo real, ajustando os tempos semafóricos do sistema em resposta à demanda de tráfego e à capacidade do sistema. O propósito do SCATS é promover um controle em área que atenda melhor que o controle de interseções isoladas e não-coordenadas (Lowrie, 1992).

Este método foi desenvolvido sob uma configuração modular para ser adaptável para cidades de diferentes características e estruturas, ou seja, desde cidades pequenas e médias até os grandes centros. A filosofia de controle do SCATS é baseada na fase; no entanto, a alta flexibilidade deste equipamento permite que seja implementado o controle baseado em grupos semafóricos.

Estudos realizados sobre o desempenho deste sistema de controle, tal como o apresentado por Luk *et al.* (1982), mostram resultados positivos na redução de tempos de viagem e no número de paradas veiculares. Estes fatores impactam diretamente na economia e na redução de emissões veiculares e acidentes.

## **2.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O semáforo é uma alternativa amplamente utilizada no controle de tráfego, devido às características próprias deste tipo de controle e ainda ao aumento do volume veicular nos grandes centros. Este processo de inchamento urbano, gera por vezes situações complexas de trânsito, geralmente minimizadas pela intervenção semafórica.

Dentre as formas de controle apresentadas no capítulo, o presente trabalho é relacionado com o controle semafórico totalmente atuado em interseções isoladas. Ao trabalhar com interseções isoladas deve-se procurar fazer com que o controle empregado produza o mínimo de atraso e a máxima capacidade para o fluxo de veículos e, quando necessário, promova a travessia segura dos pedestres. Outros objetivos, como por exemplo a redução da poluição ambiental e do consumo de combustível, também podem e têm sido considerados na definição dos modernos sistemas de controle semafórico.

### **3. TÉCNICAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADAS A CONTROLE**

Este capítulo apresenta o suporte teórico das ferramentas de inteligência artificial utilizadas em controle semafórico. Assim são abordados os conceitos básicos de Sistemas Inteligentes, Lógica *Fuzzy*, Redes Neurais Artificiais e Sistemas Híbridos, bem como são citadas aplicações destas técnicas.

#### **3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS**

Após a Segunda Grande Guerra, iniciaram-se as pesquisas sobre máquinas inteligentes, sendo que a primeira publicação acerca do tema foi do matemático inglês Alan Turing, em 1947. Turing pode ter sido o primeiro pesquisador a supor que a Inteligência Artificial (IA) pudesse apresentar soluções computacionais que viabilizassem a construção de máquinas inteligentes. Em meados dos anos 50, já era grande o número de pesquisadores investigando a IA, sendo que a maioria deles trabalhava com base na programação computacional. No entanto, apenas em 1956 a IA começa a ser reconhecida como ciência (McCarthy, 2003).

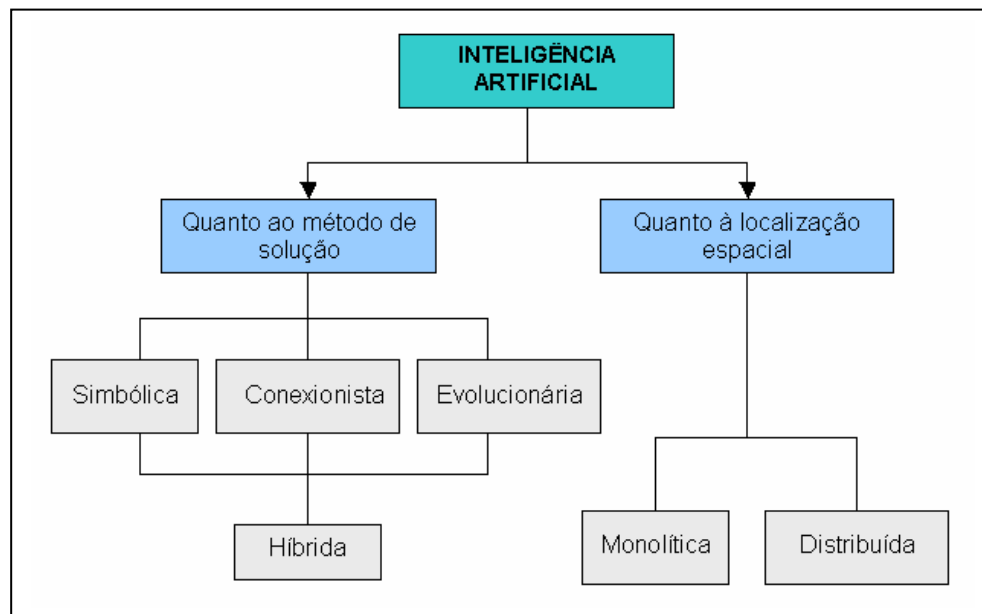
De acordo com McCarthy (2003), Inteligência Artificial (IA) é a ciência que estuda a concepção de máquinas inteligentes, especialmente através de programas computacionais inteligentes. Relaciona-se à tarefa de utilizar computadores para emular a inteligência humana, no entanto, a AI não precisa confinar-se apenas aos métodos que são biologicamente observáveis.

#### **3.2. SISTEMAS INTELIGENTES**

O que pode ser considerado um sistema inteligente é, ainda, bastante polêmico. Um subterfúgio permite identificar sistemas inteligentes de forma indireta, considerando-se um programa de computador inteligente quando realiza uma tarefa, que se fosse feita por um ser humano, seria considerada inteligente (Bauchspiess, 2002; McCarthy, 2003). Mas sistemas complexos não devem ser confundidos com sistemas inteligentes. Sendo assim, um robô manipulador que aplica pontos de solda na carroceria de veículos, apesar de realizar uma seqüência complexa de movimentos, ter requisitos de operação em tempo real e segurança aguçados, não é considerado inteligente. Este robô apenas repete uma seqüência de movimentos previamente armazenada, ou seja, é programado para executar esta tarefa e,

assim, é incapaz de se adaptar à situações novas que podem surgir durante sua operação. Uma das características de sistemas inteligentes é justamente a capacidade de aprender, de se adaptar a um ambiente desconhecido ou a uma nova situação (Bauchspiess, 2002).

De acordo com Franceschi *et al.* (2001), a IA pode ser classificada quanto ao método de solução de problemas e quanto à localização espacial, como está esquematizado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** – Estrutura organizacional da Inteligência Artificial

Quanto ao **método de solução de problemas**, a IA pode ser:

- **Simbólica** – são os sistemas especialistas. Possui como ferramenta básica para manipular o conhecimento a lógica, com suas regras de inferência inspiradas nos silogismos enunciados há mais de 2.000 anos por Aristóteles
- **Conexionista** – são basicamente as Redes Neurais, as quais são aplicadas a problemas mal definidos, mas que geralmente são reconhecidos através de exemplos. A abordagem conexionista considera impossível reduzir a uma seqüência de passos lógicos e aritméticos (algoritmo) algumas atividades humanas realizadas com facilidade e rapidez, como reconhecer rostos, compreender e traduzir línguas, evocação de memória associativa.
- **Evolucionária** – são métodos heurísticos baseados na teoria da evolução de Charles Darwin, conhecidos como Algoritmos Genéticos. É um exemplo de solução de problema bem definido de sobrevivência de uma espécie em ambiente variável. Pode ser encarada como um método de otimização com restrições variáveis e muitas vezes desconhecidas.

- **Híbrida** – são os sistemas estruturados a partir da associação de dois ou mais métodos de I.A., tais como sistemas *neurofuzzy*.

Quanto à **localização espacial**, a I.A. pode ser:

- **Monolítica** – envolve sistemas simples sem modularidade, como é o caso de sistemas especialistas.
- **Distribuída** – a Inteligência Artificial Distribuída (I.A.D.) preocupa-se principalmente com a criação de agentes inteligentes autônomos e com a comunicação de conhecimentos (cooperação) entre sistemas inteligentes (módulos) (Bauchspiess, 2002; Franceschi *et al.*, 2001).

Como aplicação geral da I.A. tem-se diversos exemplos, tais como jogos diversos, reconhecimento de padrões, compreensão de linguagem natural, reconhecimento de imagens, sistemas inteligentes, dentre outros. Todas estas aplicações estão relacionadas a diferentes áreas, como educação (ensino à distância com o uso de sistemas multiagentes), economia (previsões, reconhecimento de padrões), medicina (reconhecimento de padrões e de imagens, sistemas inteligentes, sistemas multiagentes), engenharia (sistemas inteligentes, reconhecimento de padrões e de imagens, sistemas multiagentes, inferência), segurança (reconhecimento de imagens), e uma infinidade de aplicações em expansão.

### 3.3. LÓGICA FUZZY

O termo *fuzzy* foi introduzido pelo professor Lofti A. Zadeh no início da década de 60, em Berkeley, Califórnia, como uma forma de modelar a incerteza da linguagem natural observada no pensamento e julgamento humanos. As primeiras realizações de comandos *fuzzy* de processos industriais surgiram na Europa no início dos anos 70, e o método desenvolvido foi reproduzido pelos japoneses no início dos anos 80. As aplicações estão em toda parte, como na economia, na medicina, nas tomadas de decisão, nas decisões de grupos, no reconhecimento de formas, em classificações, nos sistemas especialistas, nos bancos de dados, na concepção industrial.

A Lógica *Fuzzy* pode ser definida como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação computacional. Ela fornece meios de representação e de



manipulação de conhecimentos imperfeitamente descritos, vagos ou imprecisos; tais como os conceitos de “um pouco mais” ou mesmo de “grande” e “pequeno”, estabelecendo uma interface entre os dados descritos simbolicamente (variáveis lingüísticas) e numericamente (Bingham, 1998). Um sistema *fuzzy* permite implementar controladores não-lineares, em que as regras de funcionamento são obtidas de especialistas (Bauchspiess, 2002).

Esta técnica tem sido desenvolvida e aplicada em diversos campos da ciência. No campo da Engenharia de Transportes e Trânsito vários trabalhos já foram desenvolvidos e outros estão em desenvolvimento, com diferentes graus de sucesso (Jacques *et al*, 2002a).

### 3.3.1 Principais características da Lógica *Fuzzy*

- É baseada em palavras e não em números, ou seja, os “valores” são expressos lingüisticamente. Por exemplo: quente, muito frio, longe, perto, rápido, vagaroso, médio, etc.
- Possui vários modificadores de predicado como, por exemplo: muito, mais ou menos, pouco, bastante, médio, etc.
- Possui também um amplo conjunto de quantificadores, como por exemplo: poucos, vários, em torno de, usualmente.
- Faz uso das probabilidades lingüísticas, como por exemplo: provável, improvável, que são interpretados como “números *fuzzy*” e manipulados pela sua aritmética.
- Manuseia todos os valores entre os limites 0 (zero) e 1 (um).

### 3.3.2 Conjuntos *Fuzzy*

O conceito formal de conjunto *fuzzy*, fundamentado da Lógica *Fuzzy*, foi introduzido por Zadeh em 1965. Conjuntos *Fuzzy* são conjuntos de objetos que podem ser representados tanto por números reais (p.ex: fila de 4, 10 ou 28 veículos) quanto por variáveis lingüísticas (p.ex: fila pequena, fila média ou fila grande) e não apresentam contornos bem definidos. Os conjuntos *fuzzy* são formados pelos elementos propriamente ditos associados ao grau de pertinência de cada elemento no respectivo conjunto (Santos, 2003).

Na teoria clássica dos conjuntos um dado elemento do universo de discurso (domínio) pertence ou não pertence a um referido conjunto. Um conjunto *fuzzy* **A** definido no universo de discurso **U** é caracterizado pelos elementos propriamente ditos, associados ao grau ou

função de pertinência  $\mu_A$  de cada elemento do conjunto, a qual mapeia os elementos de  $U$  para o intervalo  $[0, 1]$ . As funções de pertinência são utilizadas para representar os limites dos conjuntos *fuzzy* pertencentes a uma variável, ou seja, a especificação da extensão para o qual um objeto preenche um conceito (Azevedo *et al.*, 2000). Eles associam cada elemento  $x$  pertencente a  $U$  a um número real  $\mu_A(x)$  no intervalo  $[0, 1]$ , que representa o grau em que o elemento  $x$  pertence ao conjunto  $A$ . Assim, se  $U$  é uma coleção de objetos, denotados genericamente por  $x$ , então um conjunto *fuzzy*  $A$  em  $U$  é um conjunto de pares ordenados tal que  $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in U\}$ . (Azevedo *et al.*, 2000; Zadeh, 1965).

Onde:

$A$ : conjunto *fuzzy*;

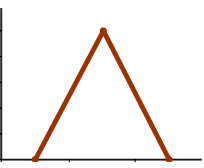
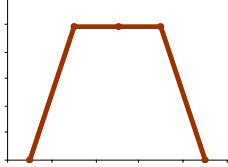
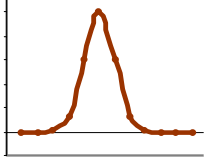
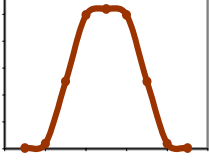
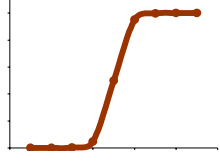
$x$ : elemento pertencente ao universo de discurso  $X$ ;

$\mu_A(x)$ : função de pertinência.

Para a construção de um conjunto *fuzzy* é necessária a identificação de um universo de discurso e da especificação de uma função apropriada de pertinência. A especificação de funções de pertinência é subjetiva, esta subjetividade vem da diferença de cada indivíduo perceber ou expressar conceitos abstratos.

Os tipos mais frequentes de funções de pertinência são: triangular, trapezoidal, gaussiana, sino generalizado e sigmoidal ou logística, como representadas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1 - Tipos de Funções de Pertinência**

Tipo	Equação representativa	Representação Gráfica
Triangular	$\mu(x;p_1,p_2,p_3)=\max(\min((x-p_1)/(p_1-p_2),(p_3-x)/(p_3-p_2)),0)$	
Trapezoidal	$\mu(x;p_1,p_2,p_3)=\max(\min((x-p_1)/(p_1-p_2),1,(p_4-x)/(p_4-p_3)),0)$	
Gaussiana	$\mu(x;c,\sigma)=e^{-(x-c)^2/2\sigma^2}$	
Sino generalizado	$\mu(x;a,b,c)=\frac{1}{1+ (x-c)/a ^{2b}}$	
Sigmoidal ou Logística	$\mu(x;a,c)=\frac{1}{1+e^{-a(x-c)}}$	

### 3.3.3 Diferentes tipos de Incertezas

Na lógica bivalente, a constatação de um evento pode ser dada por meio de dois valores absolutos, 0 (“falso”) e 1 (“verdadeiro”). Na lógica multivalorada, a constatação de um evento pode ser dada por meio de mais valores, por exemplo, 0, ½ e 1. Na Lógica *Fuzzy*, o valor “verdade” pode ser qualquer valor real no intervalo [0, 1]. Sendo assim a Lógica *Fuzzy* é uma extensão da lógica multivalorada, a qual utiliza diferentes metodologias para modelar conceitos vagos.

Existem diversas discussões acerca das diferenças entre probabilidade e pertinência *fuzzy*, visto que trata-se de dois tipos de incerteza. Portanto, deve-se inicialmente analisar a diferença das incertezas. A terminologia é variada na literatura, podendo o termo ‘incerteza’

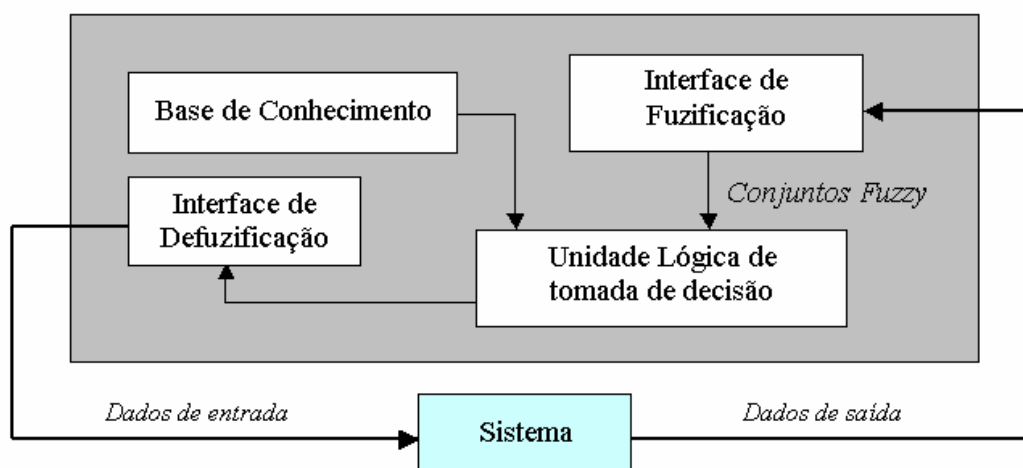
ser referido apenas para incertezas probabilísticas, e o termo ‘impreciso’ ou ‘vago’, ser usualmente referido à pertinência *fuzzy*.

Segundo Zadeh (1965), a noção de conjuntos *fuzzy* é completamente não-estatística em sua natureza. A diferença filosófica entre *fuzzyness* (possibilidade) e probabilidade é que a função de pertinência representa a similaridade de um objeto para uma definição imprecisa de sua propriedade, enquanto a função de densidade probabilidade contém informações sobre frequências relativas.

### 3.3.4 Lógica *fuzzy* aplicada a controle

A principal aplicação prática da Lógica *Fuzzy* é o Controlador *Fuzzy*. A principal vantagem deste controlador sobre os controladores tradicionais, é a habilidade de utilização de conhecimento especialista na sua estruturação. Esse conhecimento pode ser expresso com uma base de regras.

O controlador *fuzzy* consiste dos módulos de fuzificação, inferência e defuzificação, basicamente. Os componentes detalhados de um controlador *fuzzy* são (Figura 3.2):



**Figura 3.2** - Diagrama de um controlador *fuzzy* (Fonte: Niittymäki,1998)

#### a) Interface de fuzificação

A interface de fuzificação pode ser definida como o processo que faz associação dos valores observados das variáveis de entrada nos universos de discurso correspondentes. Nela são realizadas as avaliações do grau de pertinência do valor medido com relação aos diferentes conjuntos *fuzzy* da variável lingüística considerada.

#### b) Base de conhecimento

De acordo com Zadeh (1965), a base de conhecimento é o algoritmo *fuzzy* que é “um conjunto ordenado de instruções *fuzzy* sobre cuja execução reside uma solução aproximada para um problema específico”. As instruções *fuzzy* são expressas pelas regras *fuzzy* “Se-Então”.

#### c) Lógica para tomada de decisão

O comportamento do controlador *fuzzy* pode ser caracterizado pela agregação de diferentes regras *fuzzy*. Para se obter a função resultante, é necessária a utilização de operadores lógicos.

#### d) Interface de defuzificação

Após o processamento da variável de entrada do controlador *fuzzy* realizado pelo algoritmo de controle, o resultado (variável de saída) é dado no ‘formato *fuzzy*’. Sendo assim, o processo de defuzificação consiste na seleção de um valor numérico específico que represente o resultado da variável de saída *fuzzy*, produzido pelo conjunto de regras *fuzzy*. São apresentados na literatura diferentes métodos de defuzificação:

- COA – Método do centro de área;
- MC – Critério do máximo;
- MOM – Média dos máximos;
- SOM – Mínimo do máximo.

São apresentados na seqüência alguns exemplos de produtos comerciais que empregam a tecnologia da lógica *fuzzy*. São eles:

Ar condicionado, controle de aeronaves, misturadores químicos, transmissão automática de veículos, controle de forno de cimento, máquina copiadora, lavadora de louça, secador, controle de elevador, controle de fábrica, reconhecimento de letra, sistema de administração de saúde, umidificador, aquecedor de querosene, forno de microonda, refrigerador, máquina de cozinhar arroz, máquina fotográfica, comércio de ação, sistema de controle de metrô,

televisão, tradutor, torradeira, sistema de controle de tráfego, aspirador de pó, filmadora, lavadora de roupa.

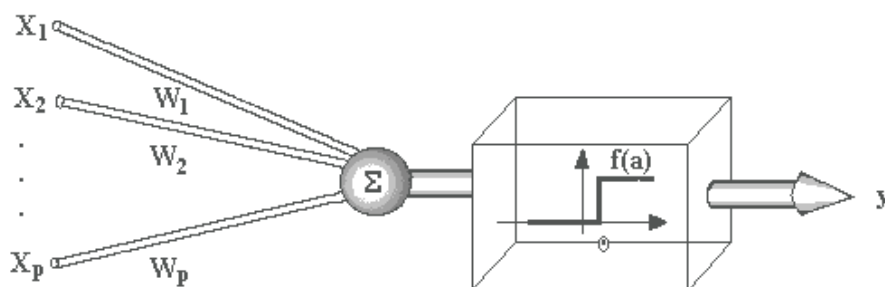
### 3.4. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

“O final da década de 80 marcou o surgimento da área de Redes Neurais Artificiais (RNA's), também conhecida como conexionismo ou sistema de processamento paralelo e distribuído. Esta forma de computação não algorítmica é caracterizada por um sistema que, em algum nível, relembra a estrutura do cérebro humano” (Braga *et al.*, 1999).

Redes Neurais são sistemas paralelos e distribuídos, compostos por unidades de processamento simples, os neurônios, onde são computadas determinadas funções matemáticas (Wasserman, 1989, *apud* Queiroz, 2001). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por conexões. Estas unidades recebem informações, as quais são processadas e repassadas.

#### 3.4.1. Neurônio Artificial

No modelo geral de neurônio artificial (Figura 3.3) os sinais de entrada ( $X_i$ ) são multiplicados pelos seus pesos sinápticos ( $W_i$ ) e em seguida são somados. Esta soma passa por uma função de ativação  $f(a)$ , a qual deve restringir a amplitude do sinal de saída ( $y$ ) a um valor finito (Haykin, 2001).



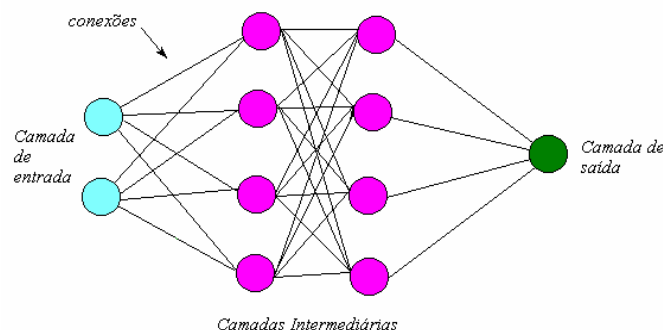
**Figura 3.3** - Neurônio artificial projetado por McCulloch (Fonte: Tatibana e Kaetsu, 2000)

Assim a função básica de um neurônio é somar as entradas e retornar uma saída.

As redes neurais são estruturadas basicamente em três (03) camadas, com funções específicas. São elas:

- **Camada de entrada:** responsável pela distribuição das informações para as camadas intermediárias, recebidas do meio externo;
- **Camadas intermediárias ou ocultas:** onde ocorre o processamento. São as camadas responsáveis pela extração das características;
- **Camada de saída:** responsável pela resposta da rede.

A estrutura básica das Redes Neurais é mostrada na Figura 3.4.



**Figura 3.4** – Estrutura básica de uma Rede Neural (Fonte: Tatibana e Kaetsu, 2000)

O processo de aprendizagem de uma rede é realizado através de um algoritmo de aprendizagem ou de treinamento, cuja função é modificar os pesos sinápticos da rede de uma forma ordenada para alcançar um objetivo de projeto desejado (Haykin, 2001). O algoritmo de aprendizado neural mais utilizado é baseado nos erros de saída, isto é, a diferença entre os dados de saída da rede neural e os resultados esperados.

### 3.4.2. Principais características das Redes Neurais Artificiais

De acordo com Haykin (2001) e Tatibana e Kaetsu (2000), as principais características das redes neurais são:

- capacidade de aprendizagem;
- tolerância a falhas;

- forma de processamento paralelo e distribuído, que dá a característica de robustez à estrutura neural, o que significa que a rede é capaz de reconhecer informações incompletas, ou ruidosas;
- adaptabilidade ou capacidade de adaptar os pesos sinápticos de acordo com mudanças ocorridas no ambiente;
- capacidade de representação de mapeamentos estáticos e dinâmicos.

### **3.4.3. Topologias das Redes Neurais**

As redes neurais podem ser classificadas mediante diferentes fatores (Tatibana e Kaetsu, 2000):

- Disposição dos neurônios;
- Ciclos;
- Processo de aprendizagem.

### **3.4.4. Aplicações gerais de Redes Neurais**

Segue a apresentação de exemplos de aplicações de Redes Neurais Artificiais. Trata-se processos de controles industriais, de pesquisa de mercado, investigativa, dentre outros. São eles: prognóstico de mercado financeiro, reconhecimento óptico de caracteres, análise e processamento de sinais, controle de processos, robótica, classificação de dados, filtros contra ruídos eletrônicos, análise de voz, avaliação de crédito, análise de aroma e odor, previsão de demanda, controle de sistemas de tráfego.

## **3.5. SISTEMAS HÍBRIDOS**

Os chamados de Sistemas Híbridos reúnem vantagens de mais de um tipo de método de abordagem para a resolução de problemas, ou seja, empregam de forma conjunta técnicas de Redes Neurais Artificiais, Lógica *Fuzzy* e Algoritmos Genéticos (Franceschi *et al.*, 2001).

As aplicações mais comuns são as que utilizam as Redes Neurais e os Algoritmos Genéticos para otimizar as regras e funções de pertinência dos conjuntos de Regra *Fuzzy*. Um sistema *Fuzzy* pode ser implementado sob a forma de uma Rede Neural e, assim, aproveitar o método de treinamento para realizar o ajuste dos parâmetros *Fuzzy*.



Outra forma de uso conjunto destas técnicas é o uso delas em diferentes módulos, no entanto complementares, de um mesmo sistema. Como exemplo, Galvão e Valença (1999) citam o emprego de uma rede neural para realizar a previsão de vazões afluentes a um reservatório que opera sob um sistema *Fuzzy*.

O sistema híbrido resultante da combinação de sistemas *Fuzzy* e Redes Neurais Artificiais, chamado genericamente de Sistema *Neurofuzzy*, tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de controladores.

### **3.6. SISTEMAS INTELIGENTES EM CONTROLE DO TRÁFEGO**

Como pode ser observado no item 3.2, o conceito de inteligência é de certa forma passível de diferentes interpretações. Modelos de controle semafórico por demanda de tráfego, como os referidos na seção 2.4.3, por exemplo, são considerados como inteligentes no âmbito da engenharia de transportes, uma vez que estes sistemas possuem um algoritmo de otimização, e agem de forma *on-line* em resposta à demanda presente na área de controle.

Sistema desta natureza, ou seja, os quais utilizam microcomputadores, sensores, câmeras, dentre outros dispositivos, poderiam ser chamados de automatizados (para as situações em que não há necessidade de intervenção humana). Sob a ótica da inteligência artificial, entretanto, um sistema só é inteligente quando emprega alguma ferramenta definida como inteligente, ou seja, quando apresenta características de adaptabilidade sob diferentes situações ou contextos que o envolvem, de generalização e de aprendizagem.

Assim, sob essa ótica nem todos os chamados Sistemas de Transporte Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems –ITS*) estão devidamente enquadrados.

### **3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Ao avaliar o conceito acerca de sistemas inteligentes, pode-se avaliar que a utilização destas técnicas em controle semafórico pode ser muito positiva, uma vez que a natureza do sistema de tráfego é muitas vezes não previsível, e é passível de ser avaliada de acordo com informações obtidas do sistema por meio de sensores.

No capítulo que segue são apresentadas as principais características do controle semafórico *fuzzy*, o qual tem sido amplamente investigado no sentido de torná-lo ainda mais adaptativo.

## 4. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

Neste capítulo é apresentado o estado-da-arte de controladores semafóricos *fuzzy*, ou seja, o conceito, as aplicações, os estudos realizados e as oportunidades de aperfeiçoamento observadas.

### 4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como foi abordado no Capítulo 3, a lógica *fuzzy* é uma técnica de inteligência artificial em expansão em diversas áreas. Suas características, tais como, a sua capacidade de emular a percepção humana e ser tratada em termos de variáveis lingüísticas (ver item 3.3), vêm ao encontro de diversas modalidades de controle em que a percepção humana se faz presente, dentre elas, o controle semafórico. Assim, 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, número este bem menor que os utilizados em controles convencionais.

A lógica *fuzzy* mostra-se adequada para aplicação em controle de tráfego, pois o conhecimento especialista acerca do sistema de tráfego pode ser extraído e organizado em conceitos e regras lingüísticas para a estruturação do banco de regras. Sendo 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 de conhecimento de funções matemáticas relativas a este processo. Esses fatores contribuem para o sucesso de controles *fuzzy* em aplicações em tempo real (Jacques *et al.*, 2002a).

O controlador semafórico *fuzzy* é um equipamento que estabelece o controle semafórico do tipo atuado pelo tráfego, baseado no princípio da extensão (ver item 2.3.3) e adaptativo em relação a flutuações das condições de tráfego (Gadêlha *et al.*, 1999). As principais características dos controladores semafóricos *fuzzy*, que os diferem dos demais controladores atuados, estão associados à sua estrutura básica, constituída pelos seguintes elementos: base de conhecimento, unidade lógica de tomada de decisão e interfaces de fuzificação e defuzificação (ver Figura 3.2). Estas características atribuem ao sistema o conceito de inteligência abordado no âmbito da inteligência artificial.

Desde o estudo de Pappis e Mamdani (1977) introduzindo a lógica *fuzzy* no controle semafórico, diversos estudos foram realizados, tais como, Nakatsuyama *et al.* (1984), Chiu

(1992), Kim (1994), Czogalla (1997), Favilla *et al.*(1993), Gadêlha *et al.* (1999), Trabia *et al.* (1999), Niittymäki e Pursula (2000), Jacques *et al.* (2002a, b e c) e Santos (2003).

No entanto, ao mesmo tempo que esses trabalhos revelam o grande potencial da lógica *fuzzy* para o desenvolvimento de controladores semafóricos eficientes e eficazes, eles também apontam para a necessidade de novos estudos nessa área.

## **4.2. CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY DESCRITOS NA LITERATURA**

O desenvolvimento de diferentes “tipos” de controladores semafóricos *fuzzy* pode ser justificado pela natureza desta técnica e do controle semafórico, uma vez que este tipo de controle possui grande parte de seus processos passíveis de ser “traduzidos” em regras lingüísticas.

Assim como o controle semafórico por tempo fixo, atuado e semi-atuado convencionais, os controladores semafóricos *fuzzy* podem atuar sob diferentes estratégias de controle, ou seja, tanto em interseções isoladas, em rede aberta ou rede fechada (Niittymäki, 1998).

Esta seção apresenta os modelos e estratégias de controle semafórico *fuzzy* presentes na literatura.

### **4.2.1 Controlador de Pappis e Mamdani**

A primeira tentativa conhecida de utilização de controle *fuzzy* em semáforos foi desenvolvida por Pappis e Mamdani (1977), a qual foi realizada sob simulação teórica de um controlador *fuzzy* em uma interseção isolada semaforizada. Neste estudo foi realizada uma comparação do método *fuzzy* desenvolvido com um controlador adaptativo ideal com tempo de ciclo ótimo. De acordo com os resultados, o controlador *fuzzy* teve o desempenho igual ou ligeiramente melhor que o método utilizado para comparação.

Neste estudo foram utilizadas 25 regras, sendo que todas relacionam as variáveis de entrada (Tempo, Chegadas e Fila) à variável de saída (Extensão) (Tabela 4.1). Os conectivos ‘SE’ e ‘SENÃO’ são interpretados como operadores ‘min’ e ‘max’, respectivamente.

Este modelo foi desenvolvido para atuar sobre uma interseção isolada com vias de mão única, e foi assumido que as chegadas veiculares externas são randômicas. O controlador é ativado a cada 10 segundos durante cada fase efetiva de verde, sendo que a primeira intervenção ocorre aos primeiros 7 segundos (mínimo de verde), e o sistema provê um máximo de 5 intervenções. Cada intervenção pode variar de 1 a 10 s. No entanto, se uma intervenção é calculada para ser menor que 10 s, não será possível realizar outra intervenção, ou seja, a fase será finalizada ao final deste tempo. Sendo assim, o tempo máximo de verde possível para uma aproximação é de 57 s.

**Tabela 4.1** – Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Pappis e Mamdani

<b>Variáveis de Entrada</b>	<b>A – nº de chegadas</b>						
	Cnj <i>Fuzzy</i>	Nenhum	Um pouco	Pouco	Médio	Muita	Extrema
	Lim CF	[0 0 4]	[0 0 5]	[0 3 6]	[0 3.5 7]	[0 4 8]	[1 5 9]
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular
	<b>Q – fila</b>						
	Cnj <i>Fuzzy</i>	Mto pequena	Pequena	Peqna maior	Média	Grande	Mto grande
	Lim CF	[4 8 12]	[8 12 16]	[12 16 20]	[16 20 24]	[20 24 28]	[24 28 32]
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular
	<b>T – tempo</b>						
	Cnj <i>Fuzzy</i>	Mto curto	Curto	Médio	Longo	Mto Longo	-
	Lim CF	[0 0 3]	[1 3 5]	[3 5 7]	[5 7 9]	[7 9 0 0]	-
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	-
<b>Variável de Saída</b>	<b>E – extensão de tempo de verde</b>						
	Cnj <i>Fuzzy</i>	Mto curto	Curto	Médio	Longo	Mto Longo	-
	Lim CF	[0 0 3]	[1 3 5]	[3 5 7]	[5 7 9]	[7 9 0 0]	-
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	-

Adaptado de Jacques *et al.*(2002a)

**Legenda:**

- Cnj Fuzzy – Conjuntos *Fuzzy*;
- Lim CF – Limites dos Conjuntos *Fuzzy*;
- Forma F.P. – forma da função de pertinência;
- Mto pequena – muito pequena;
- Peqna maior – pequena maior;
- Mto grande – muito grande;
- Mto curto – muito curto;
- Mto longo – muito longo.

#### 4.2.2 Controlador de Chiu

Outro exemplo de controle semafórico *fuzzy* é o modelo proposto por Chiu (1992), em que a lógica *fuzzy* é aplicada no controle de pequenas redes semafóricas, ou seja, no controle de múltiplas interseções alocadas em rede.

Na arquitetura proposta nesse trabalho, cada interseção age de forma independente das demais, realizando o ajuste do comprimento de ciclo, da fase e do *offset*, com base nos dados referentes à interseção, 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. As interseções controladas utilizam o mesmo conjunto de regras *fuzzy* para ajustar os parâmetros de tempo.

O controlador foi estruturado com 7 variáveis e 19 conjuntos *fuzzy*, os quais estão representados na Tabela 4.2. Para realizar o ajuste dos parâmetros de tempos semafóricos, foi utilizado um conjunto de 40 regras de decisão. As regras para ajustar o tempo de ciclo, as fases e os *offsets* são alocados separadamente e, sendo assim, os parâmetros são ajustados independentemente. Este processo causa uma notável simplificação na base de regras.

As variáveis *fuzzy* de entrada e saída do controlador são:

a) *para ajuste do comprimento de ciclo*

*Dados de entrada:*

**Highest\_sat:** é o maior grau de saturação entre as aproximações em geral;

**Croos\_sat:** é o maior grau de saturação dentre as aproximações competidoras;

*Dado de saída:* valor do ajuste do tempo de verde do ciclo corrente.

b) *para ajuste da fase*

*Dados de entrada:*

**Sat\_diff:** diferença entre o maior grau de saturação do sentido leste-oeste e o maior grau de saturação do sentido norte-sul;

**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.

c) para ajuste do *offset*

Dados de entrada:

**Vol\_diff**: diferença normalizada entre o volume de tráfego da aproximação principal e a média dos volumes das demais aproximações;

**Req\_adj**: tempo de ajuste requerido relativo ao tempo ajustável;

Dado de saída: o ajuste de tempo permitido.

**Tabela 4.2** – Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Chiu

Variáveis	Universo de Discurso	Conjuntos <i>Fuzzy</i>
Highest_sat	[0.0 1.0]	nenhum, baixo, ligeiramente baixo, bom, não alto, alto, saturado
Croos_sat		
Cycle_change	[-0.2 0.2]	não grande, não médio, não pequeno, zero, pouco pequeno, pouco médio, pouco grande
Green_change	[-0.5 0.5]	
Vol-diff	[0.0 1.0]	nenhum, baixo, médio, alto, muito alto
Req_adjust		
Allow_adjust		

Os ajustes são realizados a cada ciclo, sendo que:

- os comprimentos de ciclo são ajustados no sentido de manter um bom grau de saturação da via mais saturada;
- a fase é ajustada no sentido de manter o equilíbrio do grau de saturação das aproximações com movimentos conflitantes;
- o *offset* é ajustado no sentido de coordenar os semáforos adjacentes minimizando as paradas na direção predominante do fluxo.

A simulação realizada com o sistema *fuzzy* distribuído sobre uma pequena rede semafórica, mostrou grande eficiência na redução de atrasos. Através dos estudos realizados observou-se que o número de interseções “inteligentes” é limitado se elas são operadas com tempos de ciclos muito diferentes.

### 4.2.3 Controlador de Kim

Kim (1994, *apud* Niittymäki, 1998) estudou algoritmos *fuzzy* para o controle de interseções isoladas, e os problemas de conversão no tráfego. O algoritmo *fuzzy* proposto por este autor

realiza ajustes na duração do verde mediante avaliações das condições do tráfego ao final de cada fase. Neste estudo foram realizadas simulações que resultaram de 5% a 33% de melhora do controle realizado com a lógica *fuzzy* quando comparado com o controle de tempo fixo.

Este modelo pode controlar interseções que operam com até 4 fases, incluindo duas fases exclusivas de conversão à esquerda. Como no modelo de Pappis e Mamdani (1977), após o tempo mínimo de verde o algoritmo *fuzzy* permite até 5 intervenções para cada fase, sendo que o valor de cada extensão pode variar entre zero (0) e 10 s. A distância dos detectores de tráfego até a linha de retenção é 61 m.

A variável de saída do controlador é ‘extensão’ dada ao tempo de verde, e cada regra do controlador apresenta a forma típica:

SE	S.left = grande	E
	S.thru = médio	E
	C.left = pequeno	E
	C.thru = qualquer	
ENTÃO	EXTENSÃO = grande	
SENÃO		
SE	...	...

Onde *S.left* e *S.thru* são variáveis *fuzzy* relativas ao número de veículos presentes a 61 m da faixa de retenção da aproximação que está recebendo verde, e *C.left* e *C.thru*, são as variáveis *fuzzy* relativas à aproximação que está recebendo vermelho.

O conjunto *fuzzy* relativo à Extensão é do tipo *Singleton*, isto é, são conjuntos *fuzzy* para os quais apenas um valor do universo de discurso tem grau de pertinência igual a 1; para todos os outros valores, o grau de pertinência é igual a zero.

O mesmo autor também realizou estudos acerca de controle semafórico *fuzzy* coordenado. A base de regras *fuzzy* foi concebida no sentido de avaliar a possibilidade de bloqueio das interseções em condições de tráfego carregadas. O modelo utilizado foi o modelo para interseção isolada, sendo consideradas algumas modificações para prevenir o bloqueio da interseção. Sendo assim, as regras adequadas para esta estratégia, são do tipo:



SE O link CIE está saturado e a aproximação CI está recebendo vermelho,  
ENTÃO Não permitir o tráfego de CI para o link CIE, mas permitir tráfego saindo do link N(norte)2W(oeste), se este tem a preferencial.

De forma geral, isto significa que:

SE as condições de bloqueio estão a ponto de acontecer,  
ENTÃO Implementar a ação de manutenção correspondente para cada condição, para a prevenção de bloqueio da interseção.  
SENÃO Aplicar o mesmo algoritmo usado no controle de interseções isoladas.

Os resultados da coordenação *fuzzy* aumentam em, aproximadamente, 10% a capacidade do link quando comparados com o método convencional de coordenação semafórica de tempo fixo.

#### 4.2.4 Controlador de Czogalla

O controle proposto por Czogalla (1997), aplica a lógica *fuzzy* para promover a orientação das fases do controlador semafórico atuado, em que há priorização de transporte público. A proposta deste estudo é mostrar a eficiência do controle semafórico *fuzzy* para interseções complexas (via arterial de mão dupla e controlador multifásico), diferentemente do apresentado por Pappis e Mamdani (1977), e para situações de controle diferenciadas, no caso, a priorização do transporte público.

Este controlador foi estruturado com quatro (04) variáveis de entrada (DET1, DET2, DET3 DET4) e uma (01) de saída (NEXT). As funções de pertinência utilizadas são os termos lingüísticos **alto**, **médio** e **baixo** (ver Tabela 4.3). Os valores médios de ocupação veicular observados através de 4 detectores de tráfego foram nomeados de DET1 – DET4. A variável de saída é a resposta à mudança de fase: sim – muda de fase, não – permanece na fase corrente.

**Tabela 4.3** - Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Czogalla

	Variáveis	Conjuntos <i>Fuzzy</i>		
Variáveis de entrada	Det1	alto	médio	baixo
	Det2	alto	médio	baixo
	Det3	alto	médio	baixo
	Det4	alto	médio	baixo
Variável de saída	Next	sim	não	-

São apresentadas na Tabela 4.4 algumas regras deste controlador. A idéia básica da decisão de controle adotada é apresentada nos tópicos que seguem:

- Se a ocupação da maioria dos detectores observados é baixa ou média, ou seja, o volume tráfego na direção de saída está diminuindo, então a fase corrente deve ser finalizada.
- Se as ocupações de dois detectores quaisquer forem altas, então a fase corrente deve permanecer.
- São desejadas simetrias das regras para que a influência dos detectores seja uniforme. Esta característica é ainda representada através do fator de peso Grau de Suporte (DoS), que permanece constante em todas as regras deste controlador.

**Tabela 4.4** – Exemplo de regras do controlador de Czogalla

SE				Então	
DET1	DET2	DET3	DET4	DoS	Next
Baixo	Baixo	Baixo	Baixo	1.00	Sim
Baixo	Baixo	Baixo	Alto	1.00	Sim
Baixo	Baixo	Alto	Baixo	1.00	Sim
Baixo	Baixo	Alto	Alto	1.00	Não
Baixo	Alto	Baixo	Baixo	1.00	Sim
Baixo	Alto	Baixo	Alto	1.00	Não
Baixo	Alto	Alto	Baixo	1.00	Não
Baixo	Alto	Alto	Alto	1.00	Não

#### 4.2.5 Controlador de Favilla (*et al.*)

O estudo de Favilla *et al.* (1993) foi realizado sobre uma interseção isolada com duas aproximações igualmente solicitadas, compostas por duas e três faixas de trânsito, respectivamente. Este controlador, basicamente, compara as “chegadas veiculares” da aproximação que está recebendo a indicação de verde com a “fila em espera” na aproximação que recebe vermelho.

Neste modelo, existe uma seqüência de fases pré-definida para cada ciclo, sendo que uma fase pode ser interrompida caso não haja fila nesta aproximação. O tempo de verde corrente pode ser incrementado com valores (extensões) que variam de zero a 10 s, até que a situação de tráfego indique que há necessidade de mudança de fase, ou até que o tempo máximo de verde desta fase tenha sido atingido. Sensores permitem ao controlador ter a informação dos veículos que devem chegar na aproximação nos próximos 10 s. O controlador inclui um estimador que calcula as velocidades dos veículos, estima seus tempos de passagem pela interseção, e gera as variáveis de entrada para o algoritmo *fuzzy* do controlador.

As variáveis lingüísticas do controlador apresentado são:

##### Variáveis de entrada

- **Chegadas:** chegadas de veículos na aproximação que está recebendo a indicação de verde;
- **Fila:** número de veículos na aproximação que está recebendo a indicação de vermelho.

##### Variável de saída

- **Extensão:** extensão a ser dada ao tempo de verde corrente.

A Tabela 4.5 apresenta os conjuntos *fuzzy* e o formato das funções de pertinência para o controlador apresentado.

Este modelo apresenta um diferencial, que é a capacidade de modificar de forma *on-line* as funções de pertinência definidas inicialmente (Tabela 4.5) para a variável Extensão. Esta modificação é baseada na percepção do desempenho do controlador, medido em termos de fila residual ao final da fase de verde e na variação da fila durante a fase de verde.

**Tabela 4.5** – Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Favilla *et al.* (1993)

Variáveis de Entrada	Chegada				
	Conj Fuzzy	Quase nada	Pouco	Muito	Muito mais
	Limites	[0 0 3]	[0 3 6]	[3 6 9]	[6 9 9]
	Forma da F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular
	Fila				
	Conj Fuzzy	Muito pequena	Pequena	Média	Longa
	Limites	[0 0 3]	[0 3 6]	[3 6 9]	[6 9 9]
Forma da F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	
Variáveis de Saída	Extensão				
	Conj Fuzzy	Muito curta	Curta	Média	Longa
	Limites	[0 0 4]	[1 4 7]	[4 7 10]	[7 10 10]
	Forma da F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular

#### 4.2.6 Controlador “*Fuzzy-Expert*”

Controlador “*fuzzy-expert*” de Gadêlha *et al.* (1999) é um modelo que propõe o ajuste dos tempos de verde de uma interseção isolada que opera sob dois estágios (fases). As funções de pertinência de entrada e 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 na cidade de Fortaleza. A partir desta coleta de dados, foi verificado o tempo máximo de duração do verde para esta situação, o qual foi utilizado, juntamente com os diferentes níveis volumétricos registrados durante o dia, para estruturar a programação de tempo fixo realizada pelo TRANSYT. Assim, a partir dos volumes veiculares e dos planos semafóricos gerados pelo TRANSYT, foram definidas as variáveis de entrada, de saída, as regras de inferência e o universo de discurso:

- variáveis de entrada: fluxo de veículos das aproximações;
- variáveis de saída: tempos de verde para as aproximações.

O universo de discurso das variáveis utilizadas são:

- Fluxo de veículos: [ 0 60]
- Tempo de verde: [10 39]

As funções de pertinência de entrada e saída estão definidas na Tabela 4.6 que se segue.

**Tabela 4.6** – Conjuntos fuzzy, limites e formatos das funções de pertinência do controlador “*fuzzy-expert*”

		<b>P</b>	<b>MEP</b>	<b>ME</b>	<b>MEG</b>	<b>G</b>
<b>Entrada</b>	<b>Veículos/4 min</b>	[0 0 12 24]	[12 24 36]	[24 36 48]	[36 48 60]	[48 60 60 60]
	<b>Forma da Funç.Pert</b>	Trapezoidal	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal
<b>Saída</b>	<b>Tempo de Verde (s)</b>	[0 10 15]	[10 15 21]	[15 21 27]	[21 27 33]	[27 33 39]
	<b>Forma da Funç.Pert</b>	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular	Triangular

Sendo que:

- P – pequeno;
- MEP – médio pequeno;
- ME – médio;
- MEG – médio grande;
- G – grande.

No processo de inferência foi adotada a função de implicação de Mamdani, e no processo de defuzificação foi adotado o método do centro de gravidade. As medidas de desempenho utilizadas foram o atraso veicular e a fila.

O teste realizado permitiu verificar que o desempenho deste mecanismo de controle em tempo real é superior a estratégias de tempo fixo que, no caso do teste realizado, foram sistemas multiplanos de tempo fixo.

#### **4.2.7 Controlador de Trabia (*et al.*)**

Neste modelo é considerado um controlador de 04 fases, para interseção isolada, sendo que para cada aproximação tem-se os movimento à frente e conversão à esquerda (sendo duas faixas para os movimentos a frente e uma faixa para conversão à esquerda).

Sobre os dados de contagem volumétrica realizada através de detectores de tráfego durante um intervalo “ $\Delta t$ ”, a ação de controle no tempo “ $t$ ” é dividida em 2 estágios. O primeiro estágio envolve interpretações *fuzzy* de fluxo e de fila para todas as aproximações, com a finalidade de obter a descrição *fuzzy* de intensidade de tráfego para a aproximação que recebe verde. No segundo estágio, a continuidade da fase corrente ou sua finalização é decidida com

base nos resultados de intensidade de tráfego. Se houver a decisão de dar extensões ao tempo de verde, o valor da extensão para este modelo é de 3 s. O controlador é ativado após o intervalo de mínimo de verde, e o comprimento de cada fase não deve exceder ao valor máximo pré-definido. Para a aplicação descrita em Trabia *et al.* (1999, apud Jacques *et al.*, 2002a),  $\Delta t$  corresponde a 4 s, o tempo mínimo de verde é 8 s, e o máximo de 72 s.

A Tabela 4.7 apresenta os conjuntos *fuzzy*, os limites e as formas das funções de pertinência do controlador tratado.

**Tabela 4.7** - Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Trabia

<b>Variáveis de Entrada</b>	<b>Omax – o fluxo máximo de aproximação durante o intervalo <math>\Delta_t</math>, expresso em veículos/s/faixa</b>				
	<b>Conj Fuzzy</b>	zero	pequeno	médio	grande
	<b>Limites</b>	$(\leq 0.17)$	$(0 - 0.25)$ ;	$(0.08-0.33)$ ;	$(\geq 0.25)$ .
	<b>Forma da F. P.</b>	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal
	<b>Qmax – comprimento máximo de fila em <math>\Delta_t</math>, em veículos/s/faixa</b>				
	<b>Conj Fuzzy</b>	zero	pequeno	médio	grande
	<b>Limites</b>	$(\leq 0.74)$ ;	$(0.26 - 1.74)$ ;	$(1.26-3.26)$ ;	$(\geq 2.74)$ .
	<b>Forma da F. P.</b>	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal
	<b>Trgreen – a intensidade do tráfego no verde em <math>\Delta_t</math>, em veículos/s/faixa</b>				
	<b>Conj Fuzzy</b>	zero	pequeno	médio	grande
	<b>Limites</b>	$(\leq 0.67)$ ;	$(0.23 - 1.73)$ ;	$(1.27-3.27)$ ;	$(\geq 2.73)$ .
	<b>Forma da F. P.</b>	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal
	<b>Trred – a intensidade do tráfego no vermelho em <math>\Delta_t</math>, em veículos/s/faixa</b>				
<b>Conj Fuzzy</b>	zero	pequeno	médio	grande	
<b>Limites</b>	$(\leq 0.74)$ ;	$(0.26 - 1.74)$ ;	$(1.26-3.26)$ ;	$(\geq 2.74)$ .	
<b>Forma da F. P.</b>	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	Trapezoidal	
<b>Saída</b>	<b>E – extensão, que não propriamente uma variável lingüística</b>				
	-	E = -1 (não dar extensão de verde)		E = +1 (dar extensão de verde)	

Adaptado de Jacques et al. (2002a)

#### 4.2.8 Controlador de Niittymäki e Pursula

A lógica *fuzzy* atua em dois sentidos neste modelo proposto (Niittymäki e Pursula, 2000). Primeiramente, é empregada para selecionar a seqüência de fases (seletor *fuzzy*); depois, para determinar o valor das extensões de verde (extensor *fuzzy*). Isto é feito com o uso de um fator

específico *fuzzy* que indica a necessidade de verde para cada fase. A descrição que se segue é sobre o extensor *fuzzy*, o qual decide sobre o momento certo de terminar a fase corrente, aplicado a um controlador bifásico.

Nesse caso, as condições de tráfego são avaliadas ao longo de 100 m antes da linha de retenção, sendo esta região chamada de zona de aproximação. A zona de aproximação pode ser especificada para cada faixa separadamente. O tempo mínimo de verde do grupo focal é de 5 s, e o sistema permite até 5 intervenções. A primeira intervenção ocorre logo após o mínimo de verde, e as demais intervenções ocorrem ao final de cada extensão dada, definindo uma nova extensão até que o sistema solicite mudança de fase (extensão igual a zero, ou fila muito longa na aproximação que está recebendo vermelho) ou até que seja atingido o número máximo de intervenções permitidas para cada fase.

Na versão original, os valores das extensões podiam variar no intervalo [0.0 9.0] e, então, o máximo de verde para cada fase seria 50 s. Nas recentes atualizações do projeto FUSICO (Niittymäki e Pursula, 2000), o peso das extensões pode ser definido pelo usuário de acordo com as características globais da interseção. No caso de uma interseção com duas aproximações (onde pelo menos uma delas seja arterial), com faixas separadas para movimentos de conversão, por exemplo, o extensor *fuzzy* permite mais de seis (06) extensões, sendo que cada uma delas pode ter seus valores iguais a 5, 10 ou 15 s. Neste caso, o valor máximo de verde permitido para uma fase é de 95 s.

O conjunto *fuzzy* relativo à Extensão é do tipo *Singleton*, ou seja, conjuntos *fuzzy* para os quais apenas um valor do universo de discurso tem grau de pertinência igual a 1, e para os demais valores, o grau de pertinência é igual a zero.

Na Tabela 4.8 são apresentadas as características do controlador de Niittymäki.

**Tabela 4.8** - Conjuntos *fuzzy* definidos para o controlador de Niitymäki

<b>Variáveis de Entrada</b>	<b>A – nº de veículos que chegam durante o verde</b>				
	Cnj Fuzzy	Zero	Pouco	Médio	Muito
	Limites	$\leq 2$	(1 – 9)	(4 – 12)	$\geq 8$
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal
	<b>Q – nº de veículos em fila no vermelho</b>				
	Cnj Fuzzy	Pouco	Médio	Muito longo	-
	Limites	(0 – 10)	(5 – 15)	$\geq 8$	-
	Forma F.P.	Triangular	Triangular	Trapezoidal	-
<b>Variáveis de Saída</b>	<b>E – extensão do tempo de verde corrente</b>				
	Cnj Fuzzy	Zero	Curto	Médio	Longo
	Limites	0	5	10	15
	Forma F.P.	Singleton	Singleton	Singleton	Singleton

### 4.3. ESTUDOS SOBRE A OPERAÇÃO DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Diversos estudos específicos (Jacques *et al.* 2002a, 2002b e 2002c; Santos, 2003) têm sido realizados para avaliar isoladamente os elementos que compõem os controladores semafóricos *fuzzy*. Destes estudos podem ser identificados possíveis ajustes dos modelos existentes, bem como idéias para o desenvolvimento de novos modelos, diante do conhecimento do impacto que cada elemento causa, individualmente, na resposta do controlador.

#### 4.3.1 Diferentes formas de implementação de conectores *fuzzy*

Estudos realizados (Jacques *et al.* 2002b) revelaram que os controladores semafóricos *fuzzy* produzem operações de tráfego, em geral, melhores do que o controlador de tempo fixo tradicional ou do que alguns modelos de controle atuados pelo tráfego. Na construção da base de regras da maioria dos controladores semafóricos *fuzzy* existentes, o operador **união** é usado para implementar os conectivos "**também**" e "**ou**", e o operador **interseção** para o conectivo "**e**". Também, a função de implicação regra de operação mínima *fuzzy* (Regra de Mamdani) é frequentemente utilizada. Porém, as razões para estas escolhas não se encontram indicadas nos trabalhos onde esses controladores são apresentados.



Sendo assim, o trabalho desenvolvido por Jacques *et al.* (2002b) avalia o impacto na resposta do controlador e no desempenho do tráfego mediante o uso de diferentes alternativas para a implementação da lógica de tomada de decisão, com base em uma determinada interface de fuzificação, base de conhecimento e interface de defuzificação. A resposta do controlador e o respectivo desempenho do tráfego foram avaliados com a ajuda do programa de simulação HUTSIM (Kosonen, 1999). Os resultados do estudo mostram que a escolha entre as diferentes alternativas para a implementação da base de regras de um modelo de controlador semafórico fuzzy deve ser precedida de uma avaliação do impacto dessas alternativas disponíveis, ou seja, esta escolha não deve ser feita *a priori*, e deve considerar os objetivos desejados para o controle de tráfego.

#### **4.3.2 Impacto de utilização de diferentes métodos de defuzificação aplicados a controladores semafóricos fuzzy**

O estudo aqui apresentado foi desenvolvido por Jacques *et al.* (2002c) e apresenta uma avaliação do impacto de diferentes estratégias de defuzificação sobre o desempenho do controlador semafórico fuzzy. Nesse caso, foram empregados os conectores usuais para implementar a base de regras (união e interseção).

A interseção de estudo considerada foi uma interseção isolada de mão única, que opera sob diferentes níveis de volume de tráfego, e permite apenas o trânsito de veículos. As simulações foram realizadas com a utilização do software HUTSIM.

Para o estudo em questão, foram considerados três (03) diferentes métodos de defuzificação, sendo eles:

- **COG** – Método do Centro de Gravidade;
- **MOM** – Média dos Valores Máximos;
- **SOM** – Mínimo do Máximo.

Nas avaliações realizadas, foram enfatizados dois aspectos: a diferença no desempenho do tráfego, e a variação da situação de controle. As análises realizadas demonstram que as diferenças em ações de controle e em desempenho de tráfego são estatisticamente significativas num nível de confiança de 95%. Mostram, também, que o volume de tráfego afeta significativamente o efeito de cada método.

Os resultados deste estudo devem ser considerados como uma indicação clara de que a escolha de uma estratégia de defuzificação não deveria ser feita *a priori*. Esta escolha não só tem que levar em conta a interface de fuzificação e a base de conhecimento a ser adotada, as quais refletem as metas principais do controle de tráfego, como também o tipo de operação da interseção e os níveis de volume de tráfego a ser controlado. Para isto foi mostrado que a mesma base de conhecimento pode promover mudanças contínuas na ação de controle para um método de defuzificação e superfícies de resposta de controle muito irregulares para outros. O estudo também mostra que a realização de simulações é realmente necessária, a fim de permitir a avaliação das conseqüências de cada opção de estratégia de defuzificação.

#### **4.3.3 Impacto dos conjuntos *fuzzy* sobre o desempenho dos controladores semafóricos**

A avaliação do impacto gerado sobre o desempenho dos controladores semafóricos devido a alterações realizadas nos conjuntos *fuzzy* foi realizada por Santos (2003), através da realização de simulações. Após a definição das alterações nos conjuntos *fuzzy* iniciais que seriam testadas, foram realizadas as simulações com o software HUTSIM para cada uma das novas configurações de conjuntos *fuzzy* e para diferentes condições de volume de tráfego, previamente determinados.

Em termos das medidas de desempenho estudadas (atraso médio e porcentagem de veículos parados) ocorreram diferenças significativas entre os casos estudados para alguns níveis de volume considerados. A resposta do controlador, verificada através do tempo de verde médio para cada aproximação e duração do ciclo, apresentou sensibilidade em relação às alterações realizadas nos conjuntos *fuzzy* de entrada. Sendo assim, com base nos resultados apresentados, verifica-se que a correta definição dos conjuntos *fuzzy* é de suma importância para o desempenho dos controladores semafóricos *fuzzy*.

#### **4.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante da revisão apresentada verifica-se que, em geral, as aplicações da lógica *fuzzy* no aperfeiçoamento de controladores semafóricos utilizados em diferentes estratégias de controle semafórico têm tido sucesso.

Os controladores semafóricos *fuzzy* funcionam sobre uma base de regras e limites de conjuntos *fuzzy* (variáveis lingüísticas) pré-determinados de acordo com as condições e características do ambiente que deve ser controlado. Uma vez que ocorrem situações em que a variável lingüística assume grandezas diferentes, ou seja, as variáveis lingüísticas devem ter seus limites dos conjuntos *fuzzy* redefinidos, devido a uma brusca mudança de comportamento do ambiente, este controlador *fuzzy* não está mais “calibrado” para realizar o controle desta nova situação.

Como os conjuntos *fuzzy* são a estrutura de comparação do controlador da situação real com o objetivo do controle, é preciso dotar os limites dos conjuntos *fuzzy* de uma dada mobilidade, ou flexibilidade frente a situações que podem alterar o seu sentido, ou ainda ajustá-los para que produzam o resultado efetivamente desejado pelo especialista. Nesse contexto, o próximo capítulo apresenta e testa duas estratégias para o ajuste *on-line* dos conjuntos *fuzzy*.

## 5. CONTROLADOR SEMAFÓRICO *FUZZY* AJUSTÁVEL

Neste capítulo são apresentadas duas propostas de ajuste *on-line* dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* de entrada utilizados em controladores semafóricos *fuzzy*. A partir de um controlador *fuzzy* básico, as propostas de ajuste foram implementadas e analisadas através de simulação da operação do tráfego em uma interseção isolada. Para isto, foi necessário determinar as variáveis de controle do controlador proposto, bem como um esquema de operação básico. Ao final são apresentados os resultados e análises das simulações realizadas.

### 5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Ainda que a lógica *fuzzy* tenha a característica básica de emular a percepção humana, os sistemas *fuzzy* convencionais não conseguem capturar mudanças nessa percepção, que podem ocorrer sob determinadas condições do ambiente em que o sistema se insere. Além disso, a caracterização dos elementos de um sistema *fuzzy* (por exemplo, conjuntos *fuzzy*, base de regras, etc) que representam, efetivamente, a percepção humana, também não é uma tarefa simples. Por isso, a lógica *fuzzy* tem sido empregada, em algumas aplicações, de forma associada a outras técnicas de inteligência artificial.

Devido à característica fortemente dinâmica e aleatória do sistema de tráfego em que se aplica o controle semafórico, iniciou-se um estudo acerca do impacto gerado no sistema caso fossem feitos pequenos ajustes nos conjuntos *fuzzy* de entrada do controlador. Este estudo foi realizado por Santos (2003), e os resultados apresentaram diferentes respostas do sistema diante destas alterações. Estes resultados motivaram a realização da presente pesquisa, que visa estudar formas para viabilizar o ajuste *on-line* dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* dos controladores semafóricos. Este ajuste visa, sobretudo, refletir a variação da percepção do especialista sobre as condições do tráfego, em função de mudanças no contexto geral em que essas condições são analisadas. No entanto, o ajuste *on-line* permite também, que definições inadequadas dos conjuntos *fuzzy* possam ser corrigidas ao longo da operação do controlador, através do acompanhamento do desempenho de sua operação.

### 5.2. CARACTERIZAÇÃO DO CONTROLADOR *FUZZY*

Visto que este estudo dá continuidade a trabalhos realizados no âmbito do Mestrado em Transportes da UnB, as características do controlador *fuzzy* e da interseção de estudo são as mesmas definidas anteriormente por Jacques *et al.* (2002b) e Santos (2003). Sendo assim, as

variáveis lingüísticas, os limites dos conjuntos *fuzzy*, a base de regras, os tipos de funções de pertinência utilizadas, os tipos dos operadores utilizados para implementação dos conectores, o método de defuzificação, o comprimento do link, o número de faixas, a velocidade da via, a localização dos detectores, dentre outras características, são comuns aos trabalhos mencionados. A fim de atender corretamente às especificações vigentes no Brasil, o valor referente ao tempo mínimo de verde foi alterado. Estas considerações estão detalhadas nos itens que seguem.

### 5.2.1 Caracterização do controlador *Fuzzy* Básico

O controlador *fuzzy* básico empregado nesse estudo utiliza o método de defuzificação centro de gravidade (COG), e os conectivos “E” e “TAMBÉM” com os operadores mínimo e máximo, respectivamente, os quais foram utilizados na implementação deste controlador no MATLAB. A função de implicação adotada é a regra de operação mínima de Mamdani.

As variáveis lingüísticas deste controlador são representadas por:

#### a) Variáveis de entrada

- *Fila*: número de veículos da aproximação que está recebendo a indicação de vermelho;
- *Chegada*: número de veículos na aproximação que está recebendo a indicação de verde.

#### b) Variável de saída

- *Extensão*: extensão dada ao tempo de verde corrente, ou seja, extensão do tempo de verde que é fornecida à aproximação que está sendo servida.

Foram adotados para as variáveis lingüísticas relacionadas acima os seguintes valores possíveis de conjunto *fuzzy*:

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

Assim, esse controlador é composto por 13 conjuntos *fuzzy* associados às variáveis lingüísticas, como resumido na Tabela 5.1. O formato das funções de pertinência varia entre triangular e trapezoidal. Na Tabela 5.2 são apresentados os intervalos e formas das funções de

pertinência dos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis lingüísticas do controlador básico utilizado para o desenvolvimento da pesquisa.

**Tabela 5.1** – Conjuntos *Fuzzy* definidos para o controlador base

		<b>Conjuntos <i>Fuzzy</i></b>				
<b>Variáveis de entrada</b>	<b>Fila</b>	Pequena	Média	Longa	Qualquer	-
	<b>Chegada</b>	Zero	Pouca	Média	Muita	Qualquer
<b>Variável de saída</b>	<b>Extensão</b>	Zero	Curta	Média	Longa	-

**Tabela 5.2** – Intervalo e forma das funções de pertinência das variáveis lingüísticas

<b>Fila</b>					
<b>Conjuntos <i>Fuzzy</i></b>	Pequena	Média	Longa	Qualquer	-
<b>Limites</b>	[0 0 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]	-
<b>Forma Funç.Pert.</b>	Triangular	Triangular	Trapezoidal	Trapezoidal	-
<b>Chegada</b>					
<b>Conjuntos <i>Fuzzy</i></b>	Zero	Pouca	Média	Muita	Qualquer
<b>Limites</b>	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
<b>Forma Funç.Pert.</b>	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	Trapezoidal
<b>Extensão</b>					
<b>Conjuntos <i>Fuzzy</i></b>	Zero	Curta	Média	Longa	-
<b>Limites</b>	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	-
<b>Forma Funç.Pert.</b>	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal	-

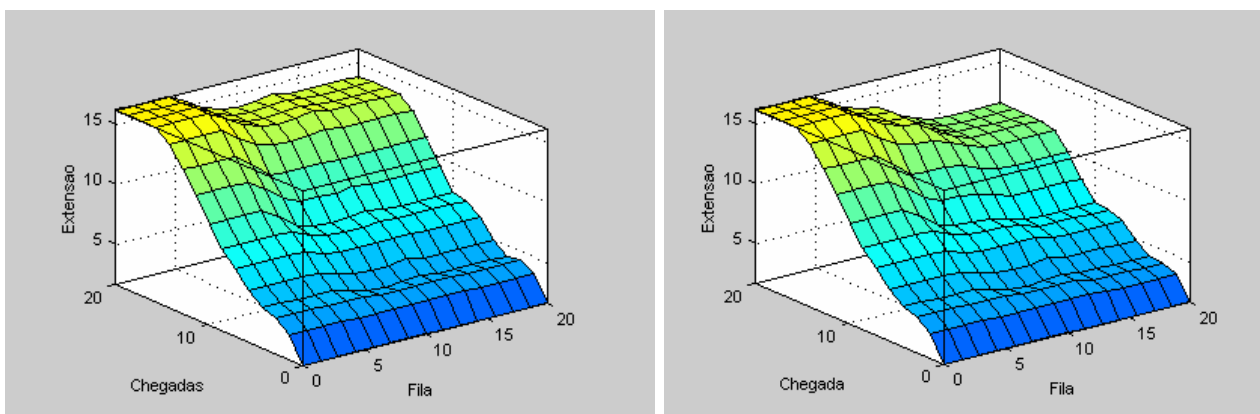
A base de regras do controlador (Tabela 5.3) é composta por 14 regras do tipo SE-ENTÃO, utilizando o operador interseção mínimo na avaliação das regras. As regras 11,12 e 13 foram incluídas para garantir que a superfície no COG não tenha grande descontinuidade (Jacques *et al.*, 2002a).

A este conjunto de regras foi adicionada a regra 14, após a realização de análises comparativas das superfícies de controle (Figura 5.1 a e b) do controlador, sem e com essa nova regra. Como pode ser verificado na Figura 5.1-a, o controlador sem esta regra perde sensibilidade quando se tem a situação de “chegada muita”, ou seja, a extensão é praticamente

constante independento da variável “fila”. No entanto, ao adicionar a regra 14, o controlador apresenta um desempenho mais adequado para diferentes situações de fila e “chegada muita”.

**Tabela 5.3** – Regras *fuzzy* utilizadas

<b>Regra</b>	<b>SE Fila</b>	<b>E Chegada</b>	<b>ENTÃO Extensão</b>
<b>1</b>	Qualquer	Zero	Zero
<b>2</b>	Pequena	Pouca	Curta
<b>3</b>	Média	Pouca	Zero
<b>4</b>	Longa	Pouca	Zero
<b>5</b>	Pequena	Média	Média
<b>6</b>	Média	Média	Curta
<b>7</b>	Longa	Média	Curta
<b>8</b>	Pequena	Muita	Longa
<b>9</b>	Média	Muita	Média
<b>10</b>	Longa	Muita	Média
<b>11</b>	None	Pouca	Curta
<b>12</b>	None	Média	Média
<b>13</b>	None	Muita	Longa
<b>14</b>	<b>Longa</b>	<b>Qualquer</b>	<b>Zero</b>



(a) Controlador Inicial

(b) Controlador Modificado

**Figura 5.1** – Superfície de Controle

### 5.2.2 Caracterização da interseção de controle

Foram realizadas algumas restrições para fins de simplificação da situação de controle, a exemplo do ocorrido nos estudos precedentes a este. Sendo assim, as características da interseção de controle deste trabalho, são:

- Interseção isolada;
- 2 faixas de trânsito em 2 vias perpendiculares, de sentido único;
- a interseção é composta de uma aproximação principal e uma secundária;
- não são permitidos movimentos de conversão;
- não há controle para pedestres, ou para transporte público;
- controle bifásico;
- Localização dos detectores de tráfego: 0 e 100 m;
- Headway de descarga = 2 seg/veículo;
- Tempo mínimo de verde = 10 s;
- Relação de volume/capacidade obedecendo, para a aproximação secundária, aos critérios apresentados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** – Relação V/C para limitação da Condição de Tráfego

<b>Condição de Tráfego</b>	<b>Relação Volume/Capacidade</b>
Volume Baixo	$V/C < 0,5$
Volume Médio	$0,5 < V/C < 0,8$
Volume Alto	$V/C > 0,8$

São analisados três diferentes níveis de volume de tráfego (baixo, médio e alto), sendo que o volume da aproximação principal é três vezes o volume da aproximação secundária, como representado na Tabela 5.5. Esta relação entre os volumes das duas aproximações é um dos critérios adotados pelo DENATRAN (1984) para a recomendação de controle atuado pelo tráfego.

**Tabela 5.5** – Volumes e Taxas de Chegada das aproximações da interseção estudada

<b>Aproximações</b>	<b>Volumes e Taxas</b>					
	<b>Baixo</b>		<b>Médio</b>		<b>Alto</b>	
	<b>(v/h)</b>	<b>(v/s)</b>	<b>(v/h)</b>	<b>(v/s)</b>	<b>(v/h)</b>	<b>(v/s)</b>
<b>App Secundária</b>	200	0,0556	300	0,0833	400	0,1111
<b>App Principal</b>	600	0,1667	900	0,2500	1200	0,3333

Onde: v/h – veículos por hora;

v/s – veículos por segundo.



### 5.3. DETERMINAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE PARA O AJUSTE *ON-LINE*

A alteração *on-line* dos conjuntos *fuzzy* de um controlador para uma interseção isolada a partir da avaliação da operação do tráfego, é o objetivo do processo de ajuste que está sendo proposto neste trabalho. Sendo assim, é necessário determinar variáveis de controle para avaliar o desempenho do tráfego sob a ação do controlador. Em interseções isoladas, alguns dos indicadores de desempenho mais utilizados, quanto à fluidez, são:

a) **Atraso:** corresponde à diferença entre o tempo de percurso sob condições de fluxo livre e o tempo efetivamente gasto no percurso sob as condições existentes.

b) **Fila:** corresponde a uma seqüência de veículos solicitantes do direito de passagem na interseção. As principais medidas referentes à fila são o tempo médio de permanência na fila, o que corresponde a um atraso, e os seus comprimentos médio e máximo.

Devido à idéia de realizar um estudo simplificado acerca da viabilidade de ajuste *on-line* dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy*, e à não disponibilidade de um simulador de tráfego para simular o processo de controle proposto, foi utilizada como medida de desempenho apenas a variável fila. Esta variável foi empregada nas avaliações de comprimento da fila máxima ao final do vermelho. Foi também considerada a diferença entre a fila inicial no verde e o número de veículos que partiram durante esse verde, ou seja, a avaliação se há veículos em espera por mais de um ciclo.

Uma vez definida a variável de controle a ser utilizada como medida de desempenho da operação do tráfego sob a atuação do controlador *fuzzy* proposto, são definidas as condições em que o desempenho avaliado solicita o ajuste dos conjuntos *fuzzy*. Assim, sendo **Da** o número de veículos que partiu da linha de retenção na aproximação que está recebendo a indicação de verde, **Qia**, a fila inicial na aproximação que está recebendo a indicação verde; e **Qfb**, a fila formada na aproximação que recebe a indicação vermelha, têm-se as relações básicas definidas como:

a) quando o ajuste é realizado ao final de cada fase

$$\text{Se} \left\{ \begin{array}{l} \text{Da} \geq \text{Qia}, \quad \text{se} \left\{ \begin{array}{l} \text{Qfb} \leq 4 \quad \longrightarrow \text{Diminuir as extensões na próxima fase} \\ 4 < \text{Qfb} \leq 8 \quad \longrightarrow \text{Manter as extensões na próxima fase em níveis} \\ \text{Qfb} > 8 \quad \longrightarrow \text{Aumentar as extensões na próxima fase} \end{array} \right. \\ \text{Da} < \text{Qia} \quad \longrightarrow \text{Diminuir as extensões na próxima fase} \end{array} \right.$$

Através dessas relações verifica-se que, no caso da fila inicial (Qia) ter sido dissipada, o controlador deve selecionar as extensões para a próxima fase em função do número de veículos retidos durante o vermelho na outra aproximação. Quanto maior esse número, maiores as extensões a serem determinadas. No caso da fila inicial não ter sido dissipada, o controlador é ajustado de forma a tornar o futuro tempo de vermelho dessa aproximação o menor possível, respeitadas as condições prevaletentes da aproximação que passará a ser servida.

b) quando o ajuste é realizado ao final de cada extensão

$$\text{Se} \left\{ \begin{array}{l} \text{Qfb} \leq 4 \quad \longrightarrow \text{Aumentar as extensões na próxima extensão} \\ 4 < \text{Qfb} \leq 8 \quad \longrightarrow \text{Manter a próxima extensão em níveis médios} \\ \text{Qfb} > 8 \quad \longrightarrow \text{Diminuir a próxima extensão} \end{array} \right.$$

Para essa situação de ajuste, a magnitude de cada extensão de verde para as condições do tráfego leva em conta o padrão de construção da fila na aproximação que está recebendo vermelho.

Os valores 4 e 8 utilizados na tomada de decisão apresentada foram definidos através da análise dos intervalos das funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* do controlador proposto (Tabela 5.6). Ou seja, estes valores devem guardar alguma relação com a definição dos conjuntos *fuzzy* que refletem as características da interseção considerada.

#### 5.4. PROCESSO DE AJUSTE ON-LINE DOS CONJUNTOS FUZZY

O ajuste dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* pode ser realizado de diferentes formas. Uma delas, que é desenvolvida e investigada neste capítulo, consiste na Seleção Dinâmica de

Planos *Fuzzy*, assim denominada em analogia à Seleção Dinâmica de Planos adotada para controladores atuados dotados de uma biblioteca de planos fixos.

Uma outra forma é a utilização de redes neurais artificiais em conjunto com o controlador semafórico *fuzzy*, compondo um controlador híbrido *neurofuzzy*. Dado à complexidade do seu desenvolvimento, o método da Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy* se constitui em um instrumento de avaliação dos potenciais benefícios que os controladores semafóricos *neurofuzzy* poderiam gerar. Isto é, serve para verificar a necessidade (e vantagens) de se realizar o ajuste *on-line* dos conjuntos *fuzzy*.

#### **5.4.1 Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy***

O processo de seleção dinâmica de planos *fuzzy* surgiu, inicialmente, da idéia da seleção de planos semafóricos pré-determinados e selecionados de acordo com a hora do dia, ou dia da semana (para controladores de tempo fixo), ou selecionados diante de diferentes condições de tráfego (para o controle atuado), e foi amadurecido quando analisado como sendo um instrumento de investigação preliminar dos potenciais benefícios do controle *neurofuzzy*.

Para estruturar o processo de Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, partiu-se de um estudo do controlador básico descrito no item 5.2.1 deste capítulo. Foram realizadas análises sobre a resposta deste controlador em comparação com a resposta de controladores dele derivados por pequenos ajustes nos seus conjuntos *fuzzy* de entrada. Ou seja, foram feitos ajustes nos valores extremos dos conjuntos *fuzzy* inicialmente definidos (controlador básico, ou situação 1), totalizando sete situações. Na realização destes ajustes a variável extensão foi mantida constante, assim como a forma das funções de pertinência (triangular, trapezoidal), para facilitar as análises propostas. A análise das diferentes situações mostrou que as mudanças na resposta do controlador, em decorrência das alterações dos conjuntos *fuzzy*, provocaram impactos significativos no seu desempenho (Santos, 2003).

Dos controladores desenvolvidos a partir do controlador básico, foram selecionadas três situações, sendo:

- *Situação 1*: situação inicial, correspondente ao controlador básico;
- *Situação 4*: redução de 20% nos valores limite dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada;

- *Situação 7*: acréscimo de 20% nos valores limite dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis fila e chegada.

Os valores dos limites dos conjuntos *fuzzy* para as variáveis chegada e fila das situações selecionadas estão apresentados na Tabela 5.6.

A partir destes valores limites das variáveis foram implementados os controladores (caso 1, caso 4 e caso 7) no MATLAB. Desta implementação foram obtidas as planilhas de controle *fuzzy*. É apresentada na Tabela 5.7 a planilha de controle do caso 1 (Caso Geral). Os valores das extensões estão na unidade décimos de segundo (Ex: 71 significa 7,1 segundos). Na Tabela 5.7, Qfa significa o tamanho da fila na aproximação que está sendo servida, calculada em função da fila inicial (Qia), número de chegadas (Aa) e número de partidas (Da); Qfb já foi definido anteriormente.

**Tabela 5.6** – Limites dos Conjuntos *Fuzzy* para as Variáveis Fila e Chegada

<b>Variável Fila</b>					
	<b>Pequena</b>	<b>Média</b>	<b>Longa</b>	<b>Qualquer</b>	<b>-</b>
<b>Caso 1</b>	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]	-
<b>Caso 4</b>	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]	-
<b>Caso 7</b>	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]	-
<b>Variável Chegada</b>					
	<b>Zero</b>	<b>Pouca</b>	<b>Média</b>	<b>Muita</b>	<b>Qualquer</b>
<b>Caso 1</b>	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
<b>Caso 4</b>	[0 0 4]	[0 4 8]	[4 8 12]	[8 12 20 20]	[0 0 20 20]
<b>Caso 7</b>	[0 0 6]	[0 6 12]	[6 12 18]	[12 18 20 20]	[0 0 20 20]

**Tabela 5.7 – Planilha de Controle relativa ao Caso 1**

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

São considerados neste trabalho três casos ou estruturas de conjuntos *fuzzy*, compondo assim um conjunto de três tabelas de extensão *fuzzy*. Como o ajuste dos conjuntos *fuzzy* deve atuar sobre o sistema de tráfego em forma de extensão de tempo de verde, foi realizada uma análise nas tabelas de extensão *fuzzy* (ver Anexo A) a fim de identificar o caso que, dentre os três, apresenta predominantemente situações de menores extensões, e maiores extensões. A classificação em ordem crescente de extensão é dada por: caso 7, caso 1 (básico) e caso 4.

Foram desenvolvidos dois métodos de ajuste, sendo um realizado ao final da fase e o outro realizado ao final de cada extensão dada ao tempo de verde. O ‘Ajuste’ é representado neste procedimento pela seleção da tabela de extensões *fuzzy* mais adequada à situação de tráfego e ao processo de controle que está proposto. Foi elaborado um fluxograma de controle para cada um dos métodos (Figuras 5.2, 5.3 e 5.4) a fim de esquematizar os processos de controle propostos. O ponto do fluxograma determinado ‘Ajuste’ significa o ajuste dos parâmetros *fuzzy*, representado neste trabalho pela seleção de planos *fuzzy*.

#### a) Ajuste ao Final da Fase

O ajuste realizado ao final da fase tem a proposta de corrigir na próxima fase as falhas detectadas na fase analisada, a fim de manter o equilíbrio da interseção controlada. Sendo assim, se é detectado que o tempo de verde não está sendo suficiente para atender aquela aproximação, ou seja, se a fila inicial do verde não for totalmente dissipada, o controlador irá

ajustar os conjuntos de forma a diminuir as extensões de verde que serão dadas na próxima fase (outra aproximação), para que a indicação verde volte mais rápido para a aproximação que não foi bem atendida.

A filosofia deste controle é sempre buscar otimizar a operação da aproximação que terminou de receber o verde, agindo na fase seguinte neste sentido.

É representado na Figura 5.2 o fluxograma de controle para este procedimento, onde:

- Aviso 7 – escolha o Caso 7 (menores extensões);
- Aviso 1 – escolha o Caso 1 (extensões médias);
- Aviso 4 – escolha o Caso 4 (maiores extensões).

Para o teste do ajuste, foram estudadas três situações básicas de fila inicial na aproximação que está recebendo o primeiro tempo de verde. Foram elas:  $Q_{ia}=0$ ;  $Q_{ia}=10$  e  $Q_{ia}=15$ .

#### *b) Ajuste ao Final da Extensão*

Os ajustes realizados ao final de cada extensão resultam em uma ação mais imediatista que o ajuste ao final da fase. Sendo assim, a partir da análise do processo de construção da fila na aproximação que está recebendo o vermelho, o ajuste age no sentido de corrigir as extensões de verde que ainda serão dadas nesta fase. A tendência é beneficiar a aproximação que está recebendo o verde quando o processo de construção da fila na outra aproximação é mais lento.

Na Figura 5.3 é apresentado o fluxograma de controle para o ajuste realizado ao final de cada extensão.

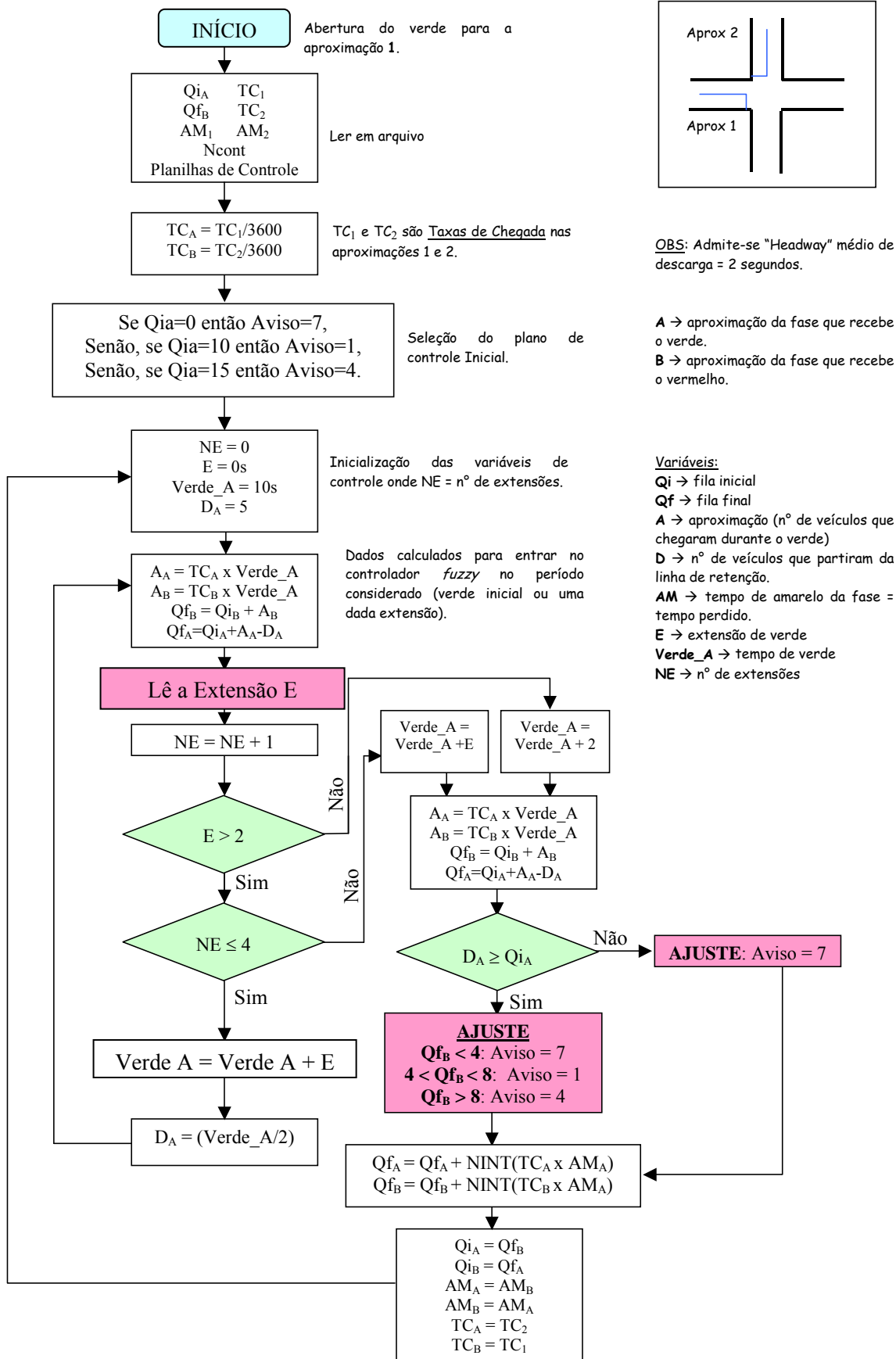


Figura 5.2 – Fluxograma de Controle para ajuste ao final da Fase.

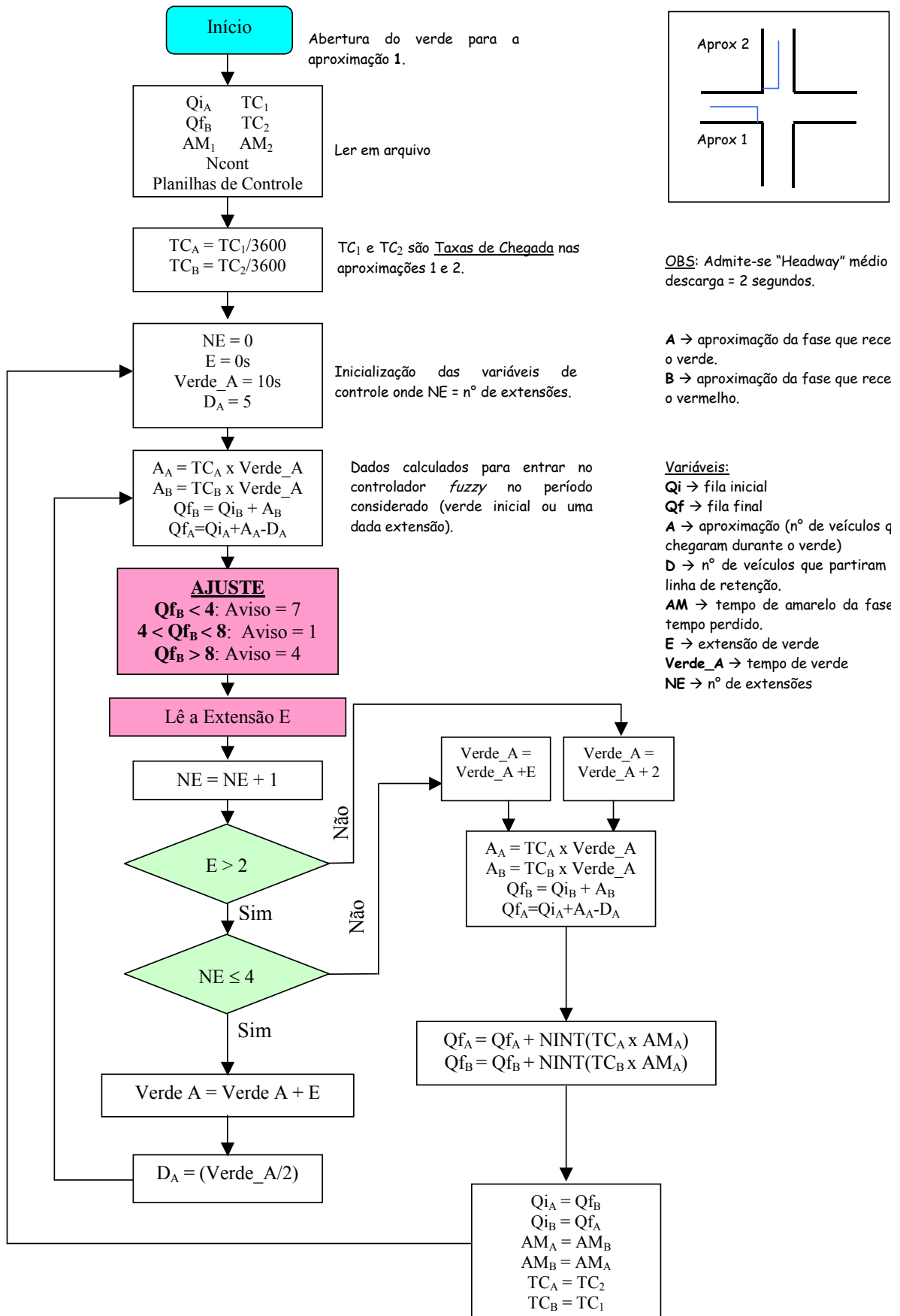


Figura 5.3 – Fluxograma de Controle para ajuste ao final da Extensão.



#### 5.4.2 Programas para testar as formas de ajuste propostas

Foram desenvolvidos dois programas a partir dos esquemas básicos de operação apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, intitulados SIMULA\_FF e SIMULA\_FV. Os programas representam estruturas de simulação de tráfego, sendo que FF, é a versão que trabalha sob condições de “fluxo fixo na fase”, e FV, a versão que trabalha sob condições de “fluxo variável na fase”. As estruturas são aptas a atuar de duas formas:

- controle com apenas uma tabela de extensão *fuzzy* (Figura 5.4);
- controle com seleção dinâmica de tabelas de extensão *fuzzy* (Figuras 5.2 e 5.3).

Foram, portanto, elaboradas seis versões a partir dos modelos básicos, apresentados na Tabela 5.8.

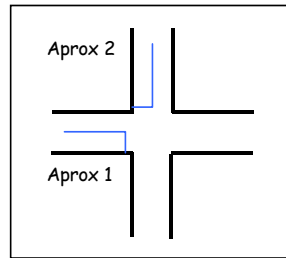
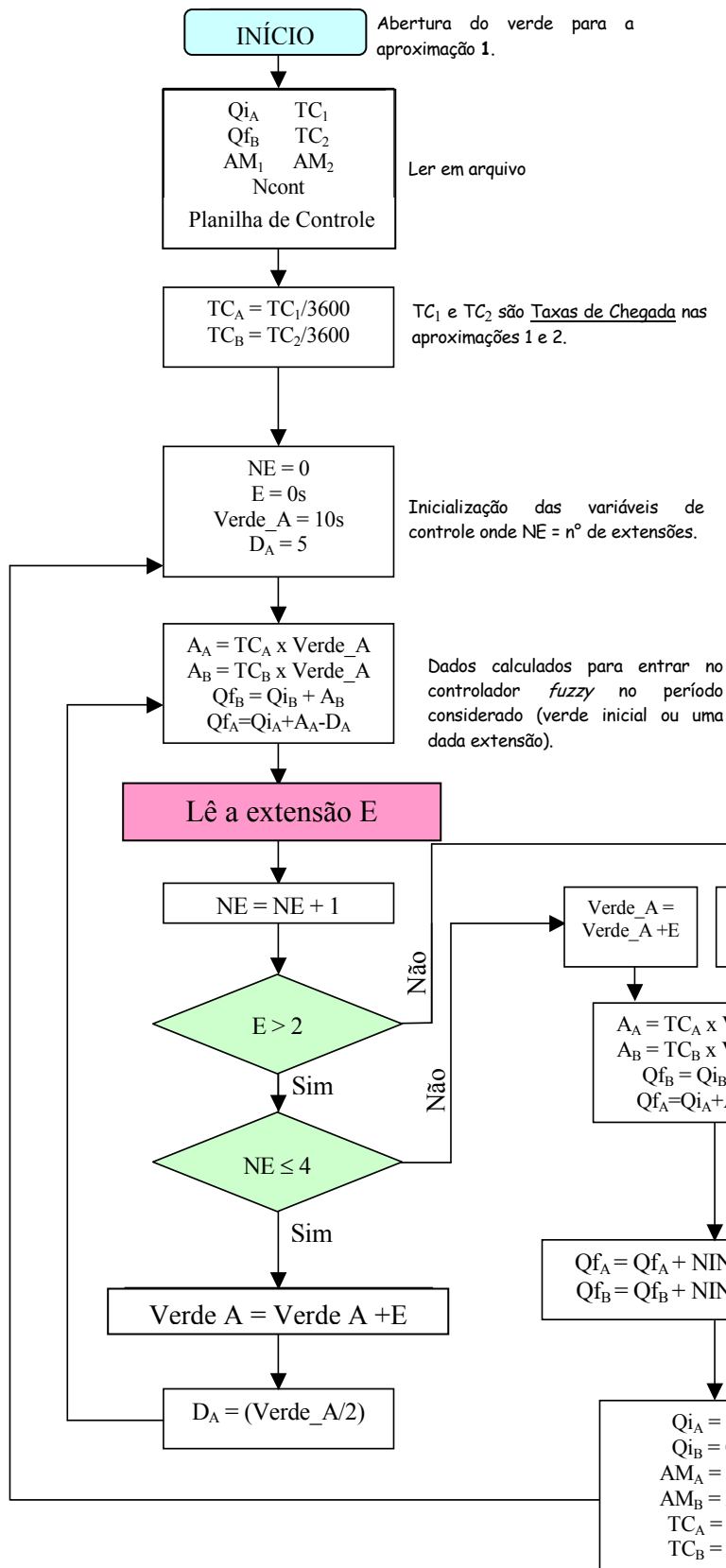
**Tabela 5.8** – Versões desenvolvidas no FORTRAN para simulações

Condições de Fluxo		Fluxo Fixo	Fluxo Variável
Controle <i>fuzzy</i> convencional		SIMULA_FFtab	SIMULA_FVtab
Seleção Dinâmica	ao final da fase	SIMULA_FFffase	SIMULA_FVffase
	ao final da Extensão	SIMULA_FFfextensao	SIMULA_Fvfextensao

##### a) Descrição básica dos programas

Os programas têm o objetivo de realizar simulações diante de condições de tráfego inicialmente definidas pelo usuário, ou seja, o volume de tráfego das aproximações, o número de veículos da fila inicial para as aproximações, o tempo de amarelo das aproximações e o número de ciclos. Para as versões de fluxo variável pode-se optar, ainda, pela taxa de variação do fluxo das aproximações. Todas estas informações são lidas pelo programa através de um arquivo ‘Extensao.txt’ que pode ser modificado de acordo com a necessidade do usuário.

Ao compor versões de FF e FV, foi assumido para simplificação, como é utilizado no TRANSYT (Courage *et al.*,1991), as chegadas externas como uniformes. Visto que as simulações são realizadas para interseções isoladas, as chegadas em ambas aproximações estão sob esta consideração.



OBS: Admite-se "Headway" médio de descarga = 2 segundos.

A → aproximação da fase que recebe o verde.  
B → aproximação da fase que recebe o vermelho.

Variáveis:

Qi → fila inicial

Qf → fila final

A → aproximação (nº de veículos que chegaram durante o verde)

D → nº de veículos que partiram da linha de retenção.

AM → tempo de amarelo da fase = tempo perdido.

E → extensão de verde

Verde\_A → tempo de verde

NE → nº de extensões

Figura 5.4 – Fluxograma de Controle com apenas uma tabela.

As versões de FV têm os volumes das aproximações ajustados ao fim de cada fase, mantendo-se constantes ao longo da fase iniciada. Esta rotina de atualização dos volumes foi feita de forma pseudoaleatória, para que a cada teste realizado, a seqüência de números randômicos fosse sempre a mesma de forma a gerar as mesmas condições de tráfego, ainda que aleatórias, para as diferentes situações de controle analisadas. Para isso, foi utilizada a função de geração de números pseudo-randômicos disponível no FORTRAN (Equação 5.1). Busca-se com essa versão verificar o comportamento do controlador diante de variações na taxa de chegada.

O ajuste da taxa de chegada das aproximações é realizado através da multiplicação da Taxa de Chegada atual por um número randômico entre [0, 1], normalizado de acordo com a Equação 5.2 e cujos valores de NR1 e NR2 dependem do volume de tráfego inicial da aproximação conforme representado na Tabela 5.9 (Equação 5.3).

$$n = \text{Random} (a) \quad (5.1)$$

$$C = (\text{NR2} - \text{NR1}) * n + \text{NR1} \quad (5.2)$$

$$\text{TC} = C * \text{TC} \quad (5.3)$$

Onde:

n = número randômico gerado pela função do Fortran;

C = valor normalizado que atualiza a Taxa de Chegada;

TC = Taxa de Chegada;

NR1 e NR2 = limite de normalização dos números randômicos.

**Tabela 5.9** – Limites de normalização do número randômico

	Volumes		
	Baixo	Médio	Alto
NR1	0,5	0,7	0,9
NR2	1,5	1,3	1,1

O programa gera dois arquivos ‘.txt’, sendo eles Relatório.txt (Figura 5.4), o qual apresenta um relatório detalhado das 30 fases percorridas, e o Medidas.txt (Figura 5.5), que apresenta os

valores de  $Q_i$ ,  $A$ ,  $Da$ ,  $Q_f$  e  $Verde\_A$ , que são respectivamente, fila inicial, número de veículos que chegaram, número de veículos que partiram da linha de retenção, fila final e tempo de verde. As variáveis  $Q_i$ ,  $A$  e  $Q_f$  têm valores de saída para ambas as aproximações, ou seja, para a aproximação que está recebendo a indicação de verde (a), e para a aproximação que está recebendo vermelho (b). As variáveis  $Da$  e  $Verde\_A$  são medidas exclusivas da aproximação que está sendo servida. Assim, de acordo com as Equações 5.4 e 5.5, tem-se:

$$Q_{fa} = Q_{ia} + A_a - D_a \quad (5.4)$$

$$Q_{fb} = Q_{ib} + A_b \quad (5.5)$$

Onde:

$Q_{ia}$  = fila inicial na aproximação que recebe verde;

$Q_{ib}$  = fila inicial na aproximação que recebe vermelho;

$Q_{fa}$  = fila final na aproximação que recebe verde;

$Q_{fb}$  = fila final na aproximação que recebe vermelho;

$A_a$  = número de veículos que chegaram durante o período considerado na aproximação que recebe verde;

$A_b$  = número de veículos que chegaram durante o período considerado na aproximação que recebe vermelho;

$D_a$  = número de veículos que partiram da linha de retenção durante o período considerado.

Está apresentada na Figura 5.5 uma parte do relatório de simulação da versão SIMULA\_FFfase, Situação 03 e volume Alto, ou seja, para o caso com seleção dinâmica de tabelas, e na Figura 5.6 a saída numérica deste exemplo. Os arquivos Relatório.txt e Medidas.txt referentes a esta simulação são apresentados integralmente no Anexo B.

\*\* RELATORIO \*\*

SELEÇÃO DINÂMICA DE TABELAS FUZZY AO FINAL DAS FASES

Sendo:

Aproximação 1: app principal

Aproximação 2: app secundária

Dados de Entrada

Qi1= 15

Qi2= 15

TC1=0.3333

TC2=0.1111

AM1= 4.0

AM2= 3.0

Ncont= 30

Resultados

Início da Fase 1. - Ciclo 1

App 2 recebendo vermelho

Qfa=Qia+Aa-Da    Qia= 15

Qfb=Qib+Ab        Qib= 15

NUM.EXT= 0	Qfb= 16	Qfa= 13	Aa= 3	Ab= 1	Da= 5	E= 0.0	Verde_A= 10.00	Tabela= 4
NUM.EXT= 1	Qfb= 17	Qfa= 11	Aa= 7	Ab= 2	Da= 11	E= 11.6	Verde_A= 21.60	Tabela= 4
NUM.EXT= 2	Qfb= 19	Qfa= 10	Aa= 11	Ab= 4	Da= 16	E= 10.8	Verde_A= 32.40	Tabela= 4
NUM.EXT= 3	Qfb= 20	Qfa= 8	Aa= 14	Ab= 5	Da= 21	E= 9.4	Verde_A= 41.80	Tabela= 4
NUM.EXT= 4	Qfb= 20	Qfa= 7	Aa= 16	Ab= 5	Da= 24	E= 6.6	Verde_A= 48.40	Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5    Qfb= 21    Qfa= 7    Aa= 19    Ab= 6    Da= 27    E= 6.5    Verde\_A= 54.90    Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 19

Partida Total de (a)= 27

Fila Residual do Verde= 7

Fila Máxima do Vermelho= 21

Verde Total em (a)= 54.90

-----  
Início da Fase 2. - Cilo 1

App 1 recebendo vermelho

Qia= 21

Qib= 7

NUM.EXT= 0	Qfb= 10	Qfa= 17	Aa= 1	Ab= 3	Da= 5	E= 0.0	Verde_A= 10.00	Tabela= 4
NUM.EXT= 1	Qfb= 14	Qfa= 12	Aa= 2	Ab= 7	Da= 11	E= 12.3	Verde_A= 22.30	Tabela= 4
NUM.EXT= 2	Qfb= 18	Qfa= 8	Aa= 4	Ab= 11	Da= 17	E= 11.6	Verde_A= 33.90	Tabela= 4
NUM.EXT= 3	Qfb= 21	Qfa= 6	Aa= 5	Ab= 14	Da= 20	E= 6.6	Verde_A= 40.50	Tabela= 4
NUM.EXT= 4	Qfb= 23	Qfa= 3	Aa= 5	Ab= 16	Da= 23	E= 6.3	Verde_A= 46.80	Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5    Qfb= 25    Qfa= 2    Aa= 6    Ab= 18    Da= 25    E= 4.1    Verde\_A= 50.90    Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 6

Partida Total de (a)= 25

Fila Residual do Verde= 2

Fila Máxima do Vermelho= 25

**Figura 5.5** – Fragmento do Relatório de Simulação da versão SIMULA\_FFffase

Qia	Qib	Aa	Ab	Da	Qfa	Qfb	verde_A
15	15	19	6	27	7	21	54.90
21	7	6	18	25	2	25	50.90
25	2	28	9	41	12	11	81.40
11	12	3	11	16	0	23	31.10
23	0	29	9	42	10	9	84.00
9	10	3	10	14	0	20	28.10
20	0	27	9	39	8	9	77.10
9	8	3	10	14	0	18	28.20
18	0	25	8	35	8	8	70.50
8	8	3	9	12	0	17	23.60
17	0	24	8	35	6	8	69.20
8	6	3	9	12	0	15	23.60
15	0	22	7	32	5	7	63.70
7	5	2	8	10	0	13	20.40
13	0	20	6	28	5	6	56.70
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30
12	0	19	6	26	5	6	52.80
6	5	2	7	10	0	12	19.30

**Figura 5.6** – Arquivo de saída numérico (Medidas.txt)

*b) Descrição das simulações realizadas*

As simulações foram realizadas para cada volume de tráfego (Tabela 5.5), para as versões relacionadas na Tabela 5.8, e para as situações detalhadas na Tabela 5.10 a seguir. Destaca-se que a Qi associada a cada Situação foi considerada como ocorrendo nas duas aproximações simultaneamente.

**Tabela 5.10** – Situações iniciais para simulações

	Volume					
	Baixo	TC <sub>1</sub> =600	Médio	TC <sub>1</sub> =900	Alto	TC <sub>1</sub> =1.200
		TC <sub>2</sub> =200		TC <sub>2</sub> =300		TC <sub>2</sub> =400
Situação 01	<b>Qi= 0 veículos</b>		<b>Qi= 0 veículos</b>		<b>Qi= 0 veículos</b>	
Situação 02	<b>Qi=10 veículos</b>		<b>Qi=10 veículos</b>		<b>Qi=10 veículos</b>	
Situação 03	<b>Qi=15 veículos</b>		<b>Qi=15 veículos</b>		<b>Qi=15 veículos</b>	

Todos os testes foram realizados considerando quinze ciclos. Para as versões SIMULA\_FFtab e SIMULA\_FVtab, foram realizadas simulações com todas as situações apresentadas para cada um dos casos (caso 1, caso 4 e caso 7) e para todos os volumes. O total de simulações realizadas e apresentadas neste trabalho foi 90.

## 5.5. TESTE DAS FORMAS DE AJUSTE DEFINIDAS

Usando os programas indicados na Tabela 5.8 foram realizadas as simulações de todas as situações anteriormente indicadas.

A partir dos resultados das simulações, foram realizadas análises sobre as diferenças entre o comprimento do Ciclo, Tempo de Verde para a via principal e para a via secundária, e Fila Residual, também para as vias principal e secundária, obtidos sob as formas de controle consideradas (ver Tabela 5.10).

São apresentados a seguir os resultados gerais obtidos com as simulações do volume alto e os estudos detalhados realizados para a Situação 3 e volume alto, que representam a condição de tráfego mais crítica dentre as consideradas. Todos os estudos realizados para as demais condições de tráfego estão dispostos nos Anexo E e F.

### 5.5.1 Resultados para os modelos de Fluxo Fixo para o Volume Alto

As simulações das diferentes condições de fila inicial para as aproximações principal e secundária, para o volume de tráfego alto, produziram os resultados mostrados nas Tabelas 5.11 e 5.12. Os valores mostrados nas duas tabelas refletem a situação observada ao final do período de simulação, isto é, ao final do 15º ciclo.

**Tabela 5.11** – Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto e Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*.

Volume Alto						
	Qi	Fila Estabilizada		Verde		Ciclo (c)
		App Princ	App Sec	App Princ	App Sec	
Ffase	qi=00	7	4	33,5	12	52,5
	qi=10	12	6	52,8	19,3	79,1
	qi=15	12	6	52,8	19,3	79,1
Fextensão	qi=00	6	4	33,4	12	52,4
	qi=10	9	5	42,3	15,2	64,5
	qi=15	9	5	42,3	15,2	64,5

**Tabela 5.12** – Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto e Planos *Fuzzy* Fixos

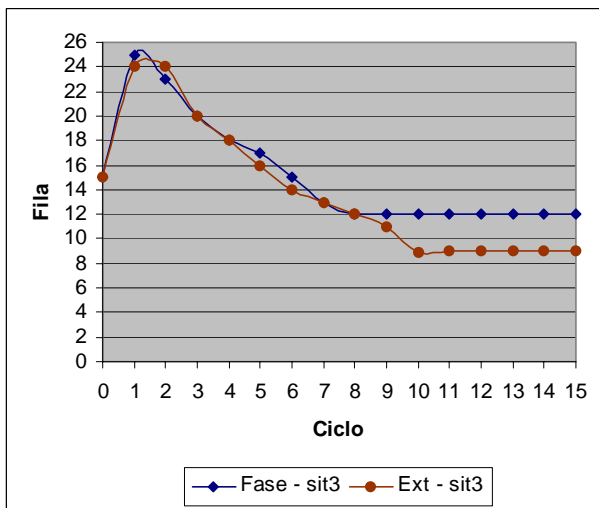
Volume Alto						
	Qi	Fila Estabilizada		Verde		Ciclo (c)
		App Princ	App Sec	App Princ	App Sec	
tabela1	qi=00	7	4	33,5	12	52,5
	qi=10	13	6	50,2	19,3	76,5
	qi=15	13	6	50,2	19,3	76,5
tabela4	qi=00	6	4	33,4	12	52,4
	qi=10	13	6	56,7	19,9	83,6
	qi=15	13	6	56,7	19,9	83,6
tabela7	qi=00	7	4	33,3	12	52,3
	qi=10	12	5	43,5	15	65,5
	qi=15	12	5	43,5	15	65,5

Os gráficos apresentados (Figura 5.7) referem-se à Situação 3, ou seja,  $q_i=15$  cujos valores de fila estabilizada, tempo de verde e comprimento de ciclo estão representados nas tabelas 5.11 e 5.12.

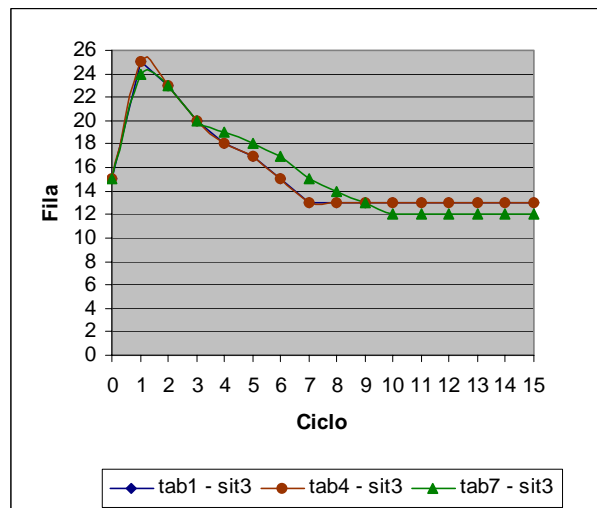
Comparando os valores destas tabelas observa-se que todos os valores de fila para a seleção dinâmica de planos *fuzzy* foram menores ou iguais aos valores que representam o controle *fuzzy* convencional, para as mesmas condições iniciais. Os valores de tempo de verde para a seleção dinâmica são, na maioria das vezes, menores ou iguais aos valores resultantes do controle *fuzzy* convencional, salvo algumas exceções, visto que estes resultados da seleção dinâmica tendem a estabilizar num valor intermediário do representado pelo **caso/tabela 1** e **caso/tabela 4** do controle *fuzzy* convencional, que representam, dentre os três casos selecionados, as situações que proporcionam, em geral, maiores comprimentos de extensão. Os resultados do comprimento de ciclo apresentam o mesmo comportamento do tempo de verde, uma vez que este comportamento foi observado para as duas aproximações.

Para o fluxo fixo, o comportamento do ajuste no fim da extensão apresenta os menores resultados de fila, e quando comparado com as simulações do controle *fuzzy* convencional assemelha-se ao comportamento do caso/tabela que disponibiliza as menores extensões, sendo que este processo viabiliza, por vezes, comprimentos de ciclo ainda menores que nesta situação.

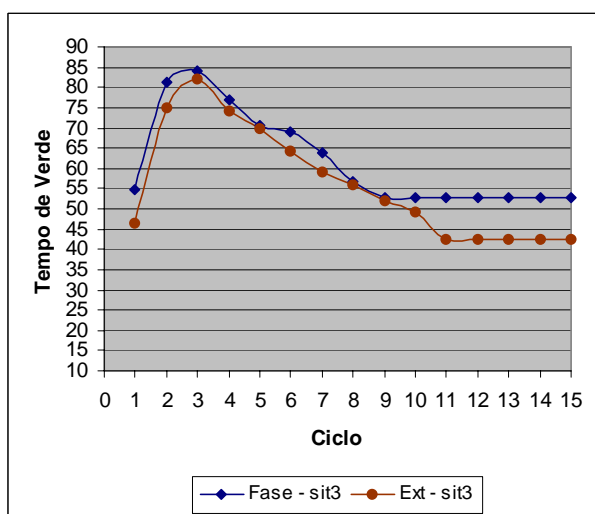




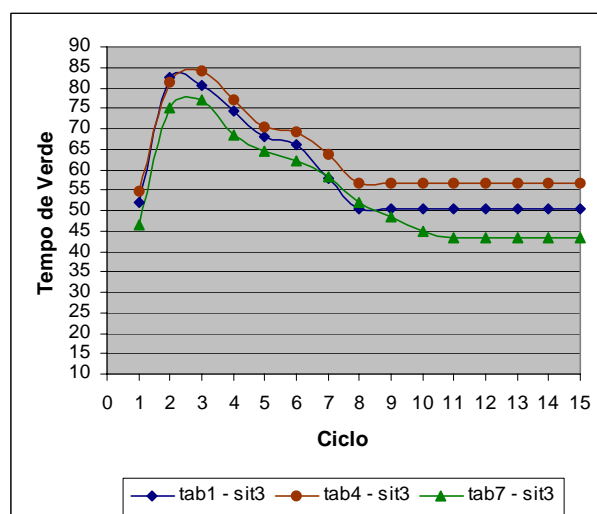
(a) Filas: Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*



(b) Filas: Planos *Fuzzy* Fixos



(c) Tempo de Verde:  
Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*



(d) Tempo de Verde:  
Planos *Fuzzy* Fixos

**Figura 5.7** - Resultados do controle de Fluxo Fixo, Volume Alto, Via Principal,  $Q_i=15$ .

### 5.5.2 Resultados para os modelos de Fluxo Variável para o Volume Alto

De forma análoga ao realizado para o estudo da situação de fluxo fixo, as Tabelas 5.13 e 5.14 mostram os resultados das simulações realizadas para a situação de volume alto, sob as diferentes condições iniciais e formas de controle. A Figura 5.8 permite a visualização dos resultados relativos à fila inicial igual a 15. Os gráficos e tabelas referentes aos demais estudos estão nos Anexos C e D.

**Tabela 5.13** – Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto e Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*

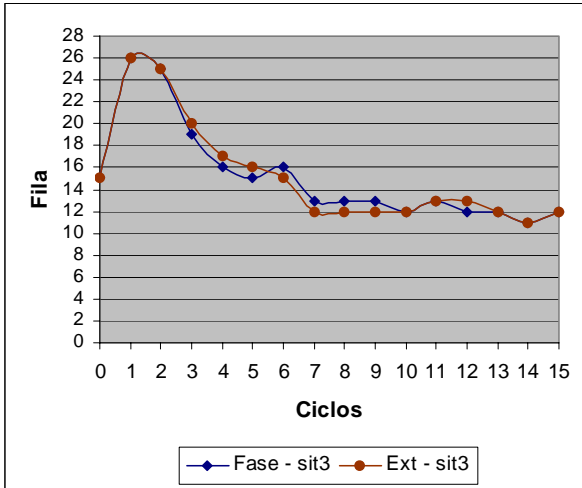
Volume Alto						
	Qi	Fila Estabilizada		Verde		Ciclo (c)
		App Princ	App Sec	App Princ	App Sec	
Ffase	qi=00	9	4	37,5	14,2	58,6
	qi=10	12	6	48,8	18,8	74,6
	qi=15	15	8	62,9	23,9	93,8
Fextensão	qi=00	7	4	34,2	12,9	54,0
	qi=10	11	6	47,5	17,7	72,1
	qi=15	15	8	60,3	22,7	90,0

**Tabela 5.14** – Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto e Planos *Fuzzy* Fixos

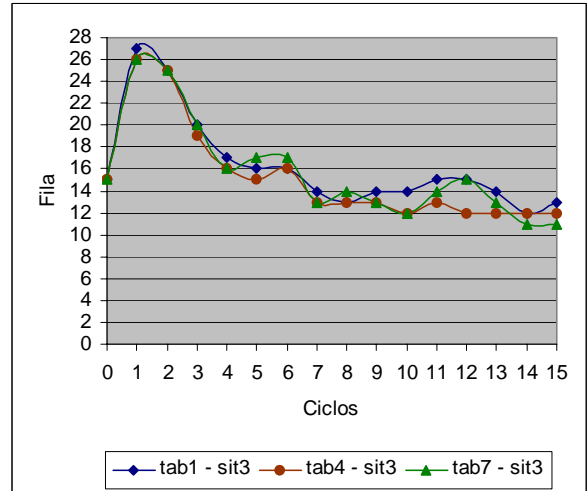
Volume Alto						
	Qi	Fila Estabilizada		Verde		Ciclo (c)
		App Princ	App Sec	App Princ	App Sec	
tabela1	qi=00	9	4	35,6	13,1	55,7
	qi=10	12	6	47,0	17,7	71,7
	qi=15	16	8	61,7	23,5	92,2
tabela4	qi=00	7	4	34,2	12,9	54,2
	qi=10	13	7	55,1	21,3	83,3
	qi=15	15	8	63,1	24,1	94,2
tabela7	qi=00	8	4	32,9	12,0	51,9
	qi=10	13	6	46,6	17,3	71,0
	qi=15	16	7	54,9	20,7	82,6

Nas simulações realizadas para a versão de Fluxo Variável as diferenças não são tão marcantes como os resultados de FF, quando comparados os valores com os resultados do controle *fuzzy* convencional. No entanto, é ainda possível perceber a vantagem de promover a seleção dinâmica de planos, uma vez que o uso dessa seleção permite resultados comparáveis ao das tabelas que produzem o melhor desempenho.

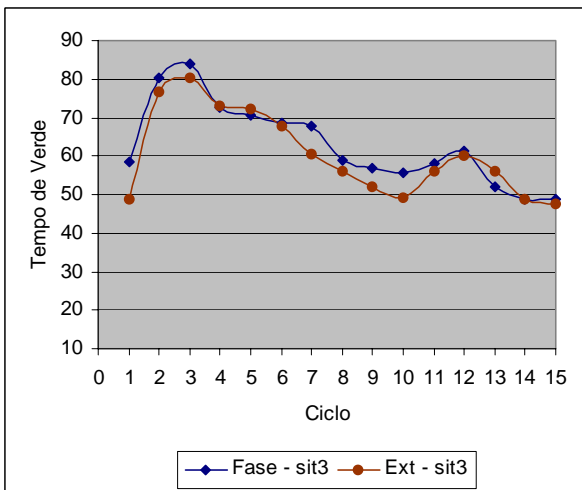
As diferenças dos resultados obtidos sob as condições de fluxo fixo e fluxo variável indicam que uma análise conclusiva sobre a dimensão dos benefícios da seleção dinâmica de planos *fuzzy* requer a realização de uma simulação microscópica mais sofisticada e completa do que a proporcionada pelos programas desenvolvidos nesta dissertação. O ideal seria a adaptação de modelos de simulação microscópicos que atualmente já permitem representar o controle semaforico *fuzzy*, para incluir a Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*.



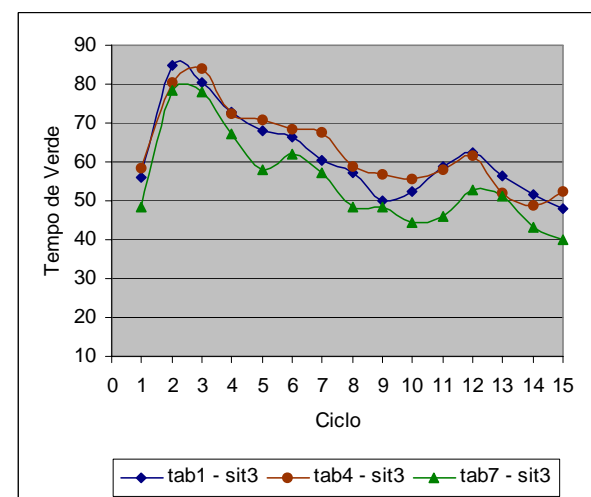
(a) Fila: Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*



(b) Fila: Planos *Fuzzy* Fixos



(c) Tempo de Verde: Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*



(d) Tempo de Verde: Planos *Fuzzy* Fixos

**Figura 5.8** - Resultados do controle de Fluxo Variável, Volume Alto, Via Principal,  $Q_i=15$

### 5.5.3 Resultados Gerais dos métodos de Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*

Na Tabela 5.15 são reunidos os resultados gerais obtidos para as diferentes condições de volume e fila inicial, sob as duas formas propostas para a seleção dinâmica de planos.

**Tabela 5.15** – Resultados estabilizados (para FF) e médios (para FV) de fila e tempo de verde para seleção dinâmica de planos *fuzzy*

		Fluxo Fixo			Fluxo Variável			
		vol baixo	vol médio	vol alto	vol baixo	vol médio	vol alto	
<b>Aproximação Principal</b>								
<b>Fila</b>	<b>Qi=0</b>	ffase	4	5	7	4	5	9
		fextensão	4	5	6	4	5	7
	<b>Qi=10</b>	ffase	4	5	12	4	6	12
		fextensão	4	5	9	4	6	11
	<b>Qi=15</b>	ffase	4	5	12	4	6	15
		fextensão	4	5	9	4	6	15
<b>Aproximação Secundária</b>								
<b>Fila</b>	<b>Qi=0</b>	ffase	1	2	4	1	2	4
		fextensão	1	2	4	1	2	4
	<b>Qi=10</b>	ffase	1	2	6	2	3	6
		fextensão	1	2	5	2	3	6
	<b>Qi=15</b>	ffase	1	2	6	2	4	8
		fextensão	1	2	5	2	4	8
<b>Aproximação Principal</b>								
<b>Tempo de Verde</b>	<b>Qi=0</b>	ffase	15,0	23,2	33,5	14,3	21,6	37,5
		fextensão	15,5	21,2	33,4	14,4	22,2	34,2
	<b>Qi=10</b>	ffase	15,0	23,2	52,8	16,6	25,1	48,8
		fextensão	15,5	21,2	42,3	16,2	25,2	47,5
	<b>Qi=15</b>	ffase	15,0	23,2	52,8	18,0	28,1	62,9
		fextensão	15,5	21,2	42,3	17,9	27,9	60,3
<b>Aproximação Secundária</b>								
<b>Tempo de Verde</b>	<b>Qi=0</b>	ffase	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	14,2
		fextensão	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,9
	<b>Qi=10</b>	ffase	12,0	12,0	19,3	13,3	13,9	18,8
		fextensão	12,0	12,0	15,2	13,2	13,6	17,7
	<b>Qi=15</b>	ffase	12,0	12,0	19,3	14,1	15,0	23,9
		fextensão	12,0	12,0	15,2	13,9	14,7	22,7

Os resultados mostram que a forma de seleção ao final de cada extensão produz resultados melhores ou iguais aos da seleção ao final da fase, em termos da variável de desempenho considerada (fila). Na aproximação principal, as duas formas têm igual desempenho para os níveis de volume baixo e médio, e, para o volume alto, o desempenho da seleção ao final de cada extensão é melhor. Na aproximação secundária, as duas formas de ajuste mostraram desempenho praticamente idêntico.

Com relação aos tempos de verde, a tendência do ajuste ao final de cada extensão é de produzir valores inferiores aos do ajuste ao final da fase. Na situação de fluxo variável, embora a mesma tendência seja observada, verifica-se que as diferenças obtidas são menores. De qualquer modo, é possível concluir que a seleção de planos *fuzzy* ao final de cada extensão

tende a produzir ciclos menores. Embora não se tenha nesse tipo de controle um ciclo fixo (o ciclo que aparece no final do período de simulação de FF só é mantido se não houver mudança no volume de tráfego a ser atendido), pode-se ter uma idéia do impacto do ciclo estabilizado sobre o atraso veicular tomando como base o cálculo do ciclo ótimo para as condições de fluxo fixo estudadas.

Os estudos realizados por Webster e Cobbe (1966) mostraram que tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,50 do tempo de ciclo ótimo ( $C_o$ ) produzem atrasos não superiores a 10 – 20% do atraso geral que se obteria com o ciclo ótimo.

Sendo assim, pode-se calcular os ciclos ótimos (Equação 5.6) e as faixas de ciclos que proporcionam atrasos mínimos (Tabela 5.16), a fim de ter um parâmetro de análise dos ciclos encontrados nas simulações realizadas (Tabela 5.17).

$$C_o = \frac{1,5 T + 5}{1 - Y} \quad (5.6)$$

Onde:

$C_o$  – Ciclo ótimo (segundos);

T – tempo total perdido no ciclo (segundos);

Y – somatório das taxas de ocupação crítica de cada fase (segundos).

**Tabela 5.16** – Intervalos calculados de minimização de atrasos

	<b><math>C_o</math></b>	<b>Intervalo</b>	
<b>Volume Baixo</b>	27,89	20,92	- 41,84
<b>Volume Médio</b>	46,50	34,88	- 69,75
<b>Volume Alto</b>	139,50	104,63	- 209,25

**Tabela 5.17** – Ciclos para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy* ao final do 15º ciclo

			Fluxo Fixo		
			vol baixo	vol médio	vol alto
Ciclo (segundos)	Qi=0	ffase	34,0	42,2	52,5
		fextensão	34,5	40,2	52,4
	Qi=10	ffase	34,0	42,2	79,1
		fextensão	34,5	40,2	64,5
	Qi=15	ffase	34,0	42,2	79,1
		fextensão	34,5	40,2	64,5

Ainda que o critério de análise de desempenho adotado para o controlador apresentado neste trabalho seja a fila máxima no vermelho, observa-se pelas Tabelas 5.16 e 5.17 que os valores de ciclo referentes aos volumes baixo e médio estão dentro da faixa de minimização de atraso definida para ciclo constante. Os comprimentos de ciclo do volume alto não ficaram dentro da faixa determinada pelo cálculo do ciclo ótimo, mas estão no limite recomendável pelo DENATRAN (1984) de 30 a 120 segundos. Vale ainda considerar que controladores *fuzzy* estão sujeitos a variações em resposta a novas condições de tráfego, ainda que a fila e o ciclo estabilizem.

#### 5.5.4 Comparação Geral entre os diferentes controladores *fuzzy* estudados

Nessa seção é feita uma análise comparativa entre o controlador *fuzzy* convencional e os que usam a Seleção Dinâmica de Planos. Os resultados da variável adotada para medir o desempenho do controlador *fuzzy* (fila ao final do vermelho) e os relacionados ao tempo de verde para cada aproximação são analisados de modo a comparar as formas de ajuste *on-line* com os resultados produzidos pelas diferentes tabelas de controle, empregadas de modo isolado (controlador *fuzzy* convencional).

A seguir são apresentadas as tabelas de resultados contendo o resumo das filas no vermelho (Tabela 5.18) e dos tempos de verde (Tabela 5.19), para todas as situações ao final do 15º ciclo (para FF) e em valores médios (para FV).

**Tabela 5.18** – Resumo das filas no vermelho para todas as situações ao final do 15º ciclo (para FF) e em valores médios (para FV)

		Volume Baixo			Volume Médio			Volume Alto		
		Qi=0	Qi=10	Qi=15	Qi=0	Qi=10	Qi=15	Qi=0	Qi=10	Qi=15
Principal	FFffase	4	4	4	5	5	5	7	12	12
	FFfext	4	4	4	5	5	5	6	9	9
	FFtab 1	4	4	4	5	5	5	7	13	13
	FFtab 4	4	4	4	5	5	5	6	13	13
	FFtab 7	4	4	4	5	5	5	7	12	12
	FVffase	4	4	4	5	6	6	9	12	15
	FVfext	4	4	5	5	6	6	7	11	15
	FVtab 1	4	4	4	5	6	6	9	12	16
	FVtab 4	4	4	4	5	6	6	7	13	15
FVtab 7	4	4	5	5	6	6	8	13	16	
Secundária	FFffase	1	1	1	2	2	2	4	6	6
	FFfext	1	1	1	2	2	2	4	5	5
	FFtab 1	1	1	1	2	2	2	4	6	6
	FFtab 4	1	1	1	2	2	2	4	6	6
	FFtab 7	1	1	1	2	2	2	4	5	5
	FVffase	1	2	2	2	3	4	4	6	8
	FVfext	1	2	2	2	3	4	4	6	8
	FVtab 1	1	2	2	2	3	4	4	6	8
	FVtab 4	1	2	2	2	3	4	4	7	8
FVtab 7	1	2	2	2	3	4	4	6	7	

**Tabela 5.19** – Resumo dos tempos de verde para todas as situações ao final do 15º ciclo (para FF) e em valores médios (para FV)

		Volume Baixo			Volume Médio			Volume Alto		
		Qi=0	Qi=10	Qi=15	Qi=0	Qi=10	Qi=15	Qi=0	Qi=10	Qi=15
Principal	FFffase	15	15	15	23,2	23,2	23,2	33,5	52,8	52,8
	FFfext	15,5	15,5	15,5	21,2	21,2	21,2	33,4	42,3	42,3
	FFtab 1	15,2	15,2	15,2	23,9	23,9	23,9	33,5	50,2	50,2
	FFtab 4	15,5	15,5	15,5	21,2	21,2	21,2	33,4	56,7	56,7
	FFtab 7	15	15	15	23,2	23,2	23,2	33,3	43,5	43,5
	FVffase	14,3	16,6	18	21,6	25,1	28,1	37,5	48,8	62,9
	FVfext	14,4	16,2	17,9	22,2	25,2	27,9	34,2	47,5	60,3
	FVtab 1	14,2	16,5	17,8	22,1	25,5	28,1	35,6	47	61,7
	FVtab 4	14,4	16,5	18,1	22,2	25,6	28,5	34,2	55,1	63,1
FVtab 7	14,3	16,4	17,8	21,5	24,6	27,1	32,9	46,6	54,9	
Secundária	FFffase	12	12	12	12	12	12	12	19,3	19,3
	FFfext	12	12	12	12	12	12	12	15,2	15,2
	FFtab 1	12	12	12	12	12	12	12	19,3	19,3
	FFtab 4	12	12	12	12	12	12	12	19,9	19,9
	FFtab 7	12	12	12	12	12	12	12	15	15
	FVffase	12	13,3	14,1	12	13,9	15	14,2	18,8	23,9
	FVfext	12	13,2	13,9	12	13,6	14,7	12,9	17,7	22,7
	FVtab 1	12	13,2	14	12	13,6	14,8	13,1	17,7	23,5
	FVtab 4	12	13,3	14,1	12	13,9	15	12,9	21,3	24,1
FVtab 7	12	13	13,8	12	13,3	14,6	12	17,3	20,7	

Das três situações colocadas atuando individualmente (caso 1, 4 e 7), a situação 7 é a que apresenta as menores filas ao final do 15º ciclo (Tabela 5.18), sendo que para o FF, esta é a

fila estabilizada. Ao avaliar sob o critério proposto do controle, vale observar no exemplo **FFfext** para volume alto os resultados apresentados pela seleção dinâmica de planos *fuzzy*, que apresentou valores de fila estabilizada de 14% a 25% menores que as do caso 7 individualmente. Para os volumes baixo e médio, o controlador convencional (sob a operação de qualquer uma das tabelas) apresentou os mesmos resultados que os controladores com seleção de planos.

Com relação aos tempos de verde (ver Tabela 5.19), verifica-se que, para os controladores convencionais, o caso 7 tem a tendência de disponibilizar menores tempos de verde. Entre os controladores com seleção dinâmica de planos, o que realiza o ajuste dos conjuntos *fuzzy* ao final de cada extensão apresenta a maior parte dos resultados de tempo de verde ( $\approx 83\%$ ) menores que o modelo que realiza os ajustes ao final da fase, e também menores, em sua maioria ( $\approx 74\%$ ), que os valores referentes ao controle *fuzzy* convencional. Vale observar que o modelo **FFfextensão**, por vezes, apresenta resultados de tempo de verde ainda menores que os valores mínimos verificados para o controle *fuzzy* convencional. Este fato foi também observado nos resultados de comprimento de fila, e vem reafirmar o comportamento diferenciado da metodologia sugerida para controle semafórico.

É importante ressaltar que as análises foram realizadas sobre valores de fila e de tempo de verde estabilizados e lidos ao final do 15º ciclo para o controle sob as condições de fluxo fixo, e para as condições de fluxo variável as análises foram realizadas sobre a média dos valores dos 15 ciclos corridos. Optou-se por este procedimento devido ao fato de que os fluxos foram submetidos a variações bruscas (Tabela 5.9) que ocorreram ao final das fases (**FVffase**), ou ao final das extensões (**FVfextensao**), causando assim grandes oscilações nos valores de fila e de tempos de verde durante toda a simulação. Sendo assim, nem sempre o 15º resultado de **FV** representava bem a dinâmica do tráfego diante do controle realizado.

O controlador *fuzzy* com seleção dinâmica de planos tem sua resposta definida em função da demanda. Sendo assim, dependendo da fila inicial, o controlador pode optar por uma situação (caso 1, 4 ou 7), e nele permanecer por um longo período atuando como um controlador *fuzzy* convencional, como normalmente ocorre em situações de volumes mais baixos. No entanto, existem situações em que ocorre a troca de tabelas de forma contínua e aleatória, como numa mudança brusca de condição de tráfego. Sendo assim, observa-se que este controle é vantajoso, visto que amplia a condição de controle do controlador *fuzzy* convencional, e não



causa prejuízos em situações particulares de volume ou comportamento do tráfego. Dentre as duas formas propostas para a seleção dos planos *fuzzy*, os resultados mostraram que, em geral, a seleção ao final de cada extensão é mais vantajosa.

## **5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Diante dos resultados apresentados e respectivas análises, verifica-se a necessidade de realizar um estudo mais aprofundado no sentido de avaliar mais possibilidades de ajuste, já que o estudo exploratório realizado neste trabalho apresentou resultados claros de melhora no desempenho do tráfego com o ajuste do controlador *fuzzy* de forma *on-line*.

Além disso, a forma de ajuste ao final de cada extensão mostrou ser mais efetiva do que a de ajuste ao final da fase. Isso permite inferir que uma forma de ajuste mais “contínua” é mais eficiente, o que sugere vantagens na adoção de outras técnicas de inteligência artificial associadas à lógica *fuzzy* para o projeto de controladores semafóricos.

Dentre as associações já testadas na literatura para diferentes sistemas de controle, o uso de redes neurais tem se mostrado bastante eficiente (sistemas *neurofuzzy*), embora na primeira iniciativa de usar essa abordagem para controle semafórico (Bingham, 1998), os resultados tenham ficado aquém do esperado. No entanto, a tentativa de novas abordagens voltadas ao aprimoramento do controlador semafórico *fuzzy*, como a ação sobre os parâmetros dos seus conjuntos *fuzzy*, pode apresentar resultados mais promissores.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento da pesquisa. Ele inclui, também, a verificação do cumprimento dos objetivos propostos e a constatação da hipótese formulada, além de apresentar algumas análises sobre os problemas encontrados ao longo do processo de pesquisa e conseqüentes limitações da mesma. Ao final do capítulo são feitas sugestões e recomendações para os futuros trabalhos que abordem os temas tratados nesta dissertação.

### 6.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A organização do sistema de tráfego está cada vez mais complexa, e a busca de novas alternativas para atender à demanda sempre crescente é uma realidade.

A utilização de semáforos se constitui uma alternativa de controle de tráfego amplamente empregada em todo o mundo. A programação desses equipamentos pode ser feita de modo a propiciar o controle do tráfego de acordo com critérios de desempenho estabelecidos pelo órgão de trânsito, implicando no uso de diferentes técnicas.

O emprego da lógica *fuzzy* no controle semafórico é uma alternativa que está sendo investigada, e tem apresentado resultados positivos nas simulações e testes *in loco*, reduzindo o número de paradas veiculares, os comprimentos de fila e atraso global, dentre outras medidas de desempenho. Essas características são diretamente relacionadas à fluidez do tráfego e, conseqüentemente, à organização do trânsito. Outros aspectos desejados do controle do tráfego, como por exemplo, a prioridade a veículos de transporte coletivo e a segurança dos pedestres também podem ser atendidos pelo controlador semafórico *fuzzy*.

Diante da avaliação do estado-da-arte do controle semafórico que emprega a lógica *fuzzy*, que é uma técnica de Inteligência Artificial, buscou-se identificar novas possibilidades de melhorar a eficácia da utilização dessa técnica. Neste sentido, o ajuste dos valores associados às variáveis lingüísticas de entrada do controlador (conjuntos *fuzzy* de entrada), frente a diferentes condições de controle, mostrou-se uma alternativa a ser investigada para melhorar a capacidade de generalização dos equipamentos empregados no controle semafórico.

## **6.2. CUMPRIMENTO DOS OBJETIVOS E CONSTATAÇÃO DA HIPÓTESE**

O objetivo geral do trabalho, de determinar um procedimento para o ajuste “*on-line*” dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* relacionados às variáveis de entrada de um controlador semafórico, foi satisfatoriamente atendido mediante desenvolvimento do processo intitulado “Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*”. Esse processo foi investigado sob duas formas de utilização: ajuste ao final de cada fase e ajuste ao final de cada extensão.

A metodologia proposta apresentou resultados de melhora no desempenho do controlador *fuzzy* testado, o qual foi avaliado mediante análise da variável ‘fila’ em resultados de simulação sobre dados de volume de tráfego hipotéticos. Os resultados do ajuste dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* de entrada do controlador, gerados pela Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, mostraram-se satisfatórios comprovando a hipótese proposta. Sendo assim, justifica-se uma investigação mais detalhada no sentido de avaliar, através de recursos de simulação adequados, a magnitude dos benefícios advindos do seu uso em diferentes condições de tráfego.

## **6.3. PRINCIPAIS CONCLUSÕES**

O ajuste dos parâmetros de entrada dos conjuntos *fuzzy* pode ser realizado em diferentes momentos do controle, por exemplo, ao final de cada ciclo, ao final de cada fase, ou ainda ao final de cada extensão dada. Nesta dissertação, foi investigado o ajuste localizado ao final de cada fase e ao final de cada extensão. Os resultados demonstraram que ambas as alternativas impactam positivamente na resposta do controlador. No entanto, o ajuste dos parâmetros quando realizado após cada extensão mostra-se mais efetivo que nos casos analisados com o ajuste dado ao final de cada fase, produzindo benefícios maiores sob a perspectiva da medida de desempenho considerada, que foi a fila em cada aproximação ao final do respectivo tempo de vermelho.

A partir dessa avaliação pode-se concluir que a associação da lógica *fuzzy* com outra técnica de Inteligência Artificial, com vistas a permitir o ajuste dos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* em resposta a medidas de desempenho da operação do tráfego previamente definidas, merece ser devidamente estudada.

#### **6.4. LIMITAÇÕES DO ESTUDO**

A maior limitação sentida na realização do estudo foi a indisponibilidade de um software de simulação microscópica que permitisse testar devidamente a metodologia de controle proposta, levando em conta diferentes medidas de desempenho e condições de fluxo.

Assim, para testar as duas formas de implementação do ajuste dos conjuntos *fuzzy*, foi elaborado um programa para simular o impacto das mesmas sobre a resposta do controlador e a operação do tráfego. Duas saídas do simulador foram utilizadas para o teste pretendido: duração do verde atribuído a cada aproximação e a extensão da fila nas aproximações após o final de cada tempo vermelho.

#### **6.5. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS**

A título de recomendação, indica-se a necessidade de avaliar a metodologia apresentada de Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy* em um simulador de controle atuado, que possa representá-la devidamente, a fim de avaliar o atraso veicular e o número de paradas, dentre outras medidas de desempenho consideradas pertinentes para cada situação.

Como sugestões, indica-se:

- Investigar a possibilidade de associação de técnicas de inteligência artificial (algoritmos genéticos e redes neurais, principalmente) à lógica *fuzzy* para a constituição de um controlador semafórico *fuzzy* com parâmetros ajustáveis automaticamente.
- Avaliar, comparativamente, as vantagens da seleção dinâmica de planos *fuzzy* frente às produzidas pelos sistemas associados desenvolvidos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AZEVEDO, F. M., M. L. BRASIL e R. C. L. OLIVEIRA (2000) Redes Neurais com Aplicações em Controle e em Sistemas Especialistas. Ed. Bookstore, Florianópolis-SC.
- BAUCHSPIESS, A. (2002) Sistemas Inteligentes aplicados à solução de Problemas de Engenharia, Universidade de Brasília. Apostila de aula. Disponível em: <http://www.ene.unb.br/~adolfo/ISI/isi.pdf>, acessado em: 10.mai.2002.
- BINGHAM, E. (1998) Neurofuzzy Traffic Signal Control. Thesis. Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Technology.
- BRAGA, A. P., A. P. L. F. CARVALHO e T. B. LUDERMIR (1999) Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações. Ed. LTC, 1ª ed., Brasil.
- CARVALHO, R. D. e J. L. de SIQUEIRA NETO (2000) Simulação de um Sistema Reativo e Centralizado de Coordenação de Sinais de Tráfego Utilizando a Programação em Lógica com Restrições. Disponível em: <http://www.dcc.ufmg.br/pos/html/spg2000/anais/remulo/remulo.html>, acessado em: 16.jun.2004.
- 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.jul.2004.
- COURAGE, K. G., C. E. WALLACE and M. A. HADI (1991) TRANSYT-7F - Users Guide. Volume 4. Transportation Research Center, University of Florida. Gainesville, Florida.
- CZOGALLA, O. (1997) A Fuzzy Logic Application for Traffic Actuated Signal Control. IFAC Algorithms and Architectures in Real Time Control. Vilamoura. Portugal.
- DENATRAN (1984) Manual de Semáforos. Brasília: DENATRAN.
- DENATRAN (2004) Anuário Estatístico de Acidentes de Trânsito. Disponível em: <http://www.denatran.gov.br/>, acesso em: 03.jun.2004.
- EULER, G. W. (1987) Issues in Real Time Control of Traffic. Workshop Report. In: Management and Control of Urban Traffic Systems. 4<sup>th</sup> Engineering Foundation Conference, June 14-19, New England College, Henniker, New Hampshire. Engineering Foundation, New York, USA. p.53-63.
- FAVILLA, J., A. MACHION, R. GUDWIN (1992) Adaptive Fuzzy Controllers for Traffic Control. Third Annual IAKE Symposium, November 16-19, Washington.
- FAVILLA, J., A. MACHION e F. GOMIDE (1993) Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies. In: Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE International Conference on Fuzzy Systems, Vol 1, San Francisco.
- FRANCESCHI, A. S. M., J. M. BARRETO e M. ROISENBERG (2001) Relatório Técnico – LC001-06/01. Laboratório de Conexão e Ciências Cognitivas. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <http://www.inf.ufsc.br/~barreto/artigos/Rel-001-06-01.pdf>, acessado em: 02.ago.2004.

- GADÊLHA, J. C., C. F. G. LOUREIRO e H. C. JÚNIOR (1999) Aplicação de Lógica Fuzzy no Controle Semafórico de Interseções Isoladas. XIII ANPET – Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. Anais – Artigos Científicos – Vol 1. p. 641-652. São Carlos, SP.
- GALVÃO, C. O. e M. J. S. VALENÇA (1999) Sistemas Inteligentes: Aplicações em Recursos Hídricos e Ciências Ambientais. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, Coleção ABRH de Recursos Hídricos; 7.
- HAYKIN, S. (2001) Redes Neurais Princípios e Práticas, 2ª edição, Bookman.
- HOMBURGER, W. S., J. W. HALL, R. C. LOUTZENHEISER, e W. R. REILLY (1996) Fundamentals of Traffic Engineering, 14<sup>th</sup> edition, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- ITE – Institute of Transportation Engineers (1992) Traffic Engineering Handbook. 4<sup>th</sup> Ed. James L. Pline, Editor. Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- JACQUES, M. A. P., J. NITTYMÄKI e M. PURSULA (2002a) Analyzing Different *Fuzzy* Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections. In: TRB 81 ST ANNUAL MEETING. CD Rom. Washington, DC.
- JACQUES, M. A. P., J. NITTYMÄKI, M. PURSULA, e I. KOSONEN (2002b) The impact of different approximate reasoning methods on fuzzy signal controllers. Anais do 13<sup>th</sup> Mini-Euroconference, 10 a 13 de Junho de 2002, Bari – Itália, p.184 – 192.
- JACQUES, M. A. P., J. NITTYMÄKI, M. PURSULA, e I. KOSONEN (2002c) Analysis of Different Defuzzyfication Methods Applied to Fuzzy Signal Controller. In: XII CONGRESSO PANAMERICANO DE INGENIERÍA DE TRÁNSITO Y TRANSPORT. Quito – Equador. Avances en Ingeniería de Tránsito e Transporte.
- 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.jul.2004.
- KELL, J. H. e I. J. FULLERTON (1991) Manual of Traffic Signal Design. Second Edition. Institute of Transportation Engineers. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.
- KIM, S. (1994) Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems. Ph.D Thesis, Polytechnic University, USA, 139 p.
- KOSONEN I., (1999) HUTSIM – Urban Traffic Simulation and Control Model: Principles and Applications, Publication 100, Helsinki University of Technology, Transportation Engineering, Espoo, Finland, 248 p.
- 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 Intersections. Publication 1997:2E, May/1997, TFK – Transport Research Institute, Stockholm, Sweden.

- 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.
- LAW, A. M. e W. D. KELTON (1991) Simulation Modeling and Analysis. Second Edition. McGraw-Hill, Inc.
- LOWRIE, P. R. (1992) SCATS - Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System. A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic. RTA, Australia.
- LUK, J. Y. K., A. G. SIMS e P. R. LOWRIE (1982) SCATS - Application and Field Comparison with a Transyt Optimised Fixed Time System. p.71-74. IEEE.
- MCCARTHY, J. (2003) What is Artificial Intelligence? Disponível em: <http://www-formal.stanford.edu/jmc/whatisai/whatisai.html>, Acesso em: 05.ago.2003.
- MCSHANE, W. R. and R. P. ROESS (1990) Traffic Engineering. Prentice Hall Polytechnic Series in Traffic Engineering. New Jersey.
- NAKATSUYAMA, M., H. NAKAHASHI, e N. NISHIZUKA (1984) Fuzzy Logic phase controller for traffic junction in the one-way arterial road. Proceedings of the IFAC 9<sup>th</sup> Triennial World Congress, Pergamon Press, Oxford, UK, p. 2865-2870.
- NIITTYMÄKI, J. (1998) Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and *Fuzzy* Control. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of Tecnology.
- NIITTYMÄKI, J. and M. PURSULA (2000) Signal Control Using Fuzzy Logic. Fuzzy Sets and Systems, 116, p.11-22.
- OGATA, K. (1970) Modern Control Engineering. Prentice-Hall, Inc., Enlewood Cliffs, N. J.
- PAPPIS, C. P., MAMDANI, H. (1977) A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. Vol. SMC-7, N° 10.
- QUEIROZ, I. N. F. (2001) Estimativa do Fluxo de Saturação com o Auxílio de Redes Neurais. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM-04 A/2001, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, p. 100-103.
- REIS, A. K. O. (2001) Análise do Efeito da Variação do Volume de Tráfego sobre o Desempenho de planos Semafóricos de Tempo Fixo: Estudo de Caso em São Paulo. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM-01 A/2001, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, p.08-13.
- ROCHESTER, T. A. (1991) All Purpose Trunk Roads MOVA System of Traffic Control at Signals. Vol 8 - Traffic signs and lighting, Sction 1 - Traffic control equipment, PART 1, TD 35/91.
- SANTOS, D. B. L. M. (2003) Procedimento para a Construção dos Conjuntos *Fuzzy* utilizados em Controladores Semafóricos. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM 006<sup>A</sup>/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.

- SICE (2004) SICE - Sociedad Ibérica de Construcciones Eléctricas, S.A. Disponível em: [http://217.130.28.17/sice/portugues/projects/projects\\_traf\\_urb.asp](http://217.130.28.17/sice/portugues/projects/projects_traf_urb.asp). Acessado em: 06.jan.2004.
- SCOOT-UTC (2001) SCOOT Urban Traffic Control Website. Disponível em: <http://www.scoot-utc.com/>, consultado em 13.jul.2004.
- SCOOT 2.4, (1993) SCOOT Traffic Handbook. Série scoot 0400-0499. Reference: 666/HB/16101/002. Siemens Plessey Control Limited. Poole.
- TATIBANA, C. Y. e D. Y. KAETSU (2000) Uma Introdução às Redes Neurais Artificiais. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/ia/neurais/>> Acesso em: 05.ago.2002.
- TIGNOR, S. (1999) Coming to America: Innovative European traffic control. Better Roads Magazine, July, 1999. RsiCopyright. Dallas, Texas. Disponível em: <http://www.betterroads.com/articles/brjuly99b.htm> consultado em: 15.jul.2004.
- TRABIA, M.B., M. S. KASEKO e M. ANDE (1999) A Two-stage Fuzzy Logic Controller for Traffic Signals. Transportation Research Part C, Vol. 7, p.353-367.
- WASSERMAN, P.D. (1989) Neural Computing: Theory and Practice, Van Nostrand Reinhold: New York.
- WEBSTER, F. V. and B. M. COBBE (1966) Traffic Signals. Road Research Technical Paper. N° 56. London. HMSO.
- ZADEH, L. A. (1965) Fuzzy Sets, Information and Control, v.8, p.338-353.
- ZIR – Zakład Inżynierii Ruchu (2004) Traffic Engineering Company Website. Bytom - Poland. Disponível em: <http://www.zir.com.pl/e03a.html> consultado em 13.jul.2004.



# ANEXO A

---

## Tabelas de Extensões *Fuzzy*

**Tabela A.1** – Planilha de Controle relativa ao Caso 1

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

**Tabela A.2** – Planilha de Controle relativa ao Caso 4

		Qfa																					
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Qfb	0	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	
	1	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	2	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	3	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	4	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
	5	16	35	44	48	48	63	73	83	86	102	116	129	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	6	16	35	44	45	45	59	68	76	79	94	107	125	143	143	143	143	143	143	143	143	143	143
	7	16	35	44	42	42	55	68	73	76	90	107	123	140	140	140	140	140	140	140	140	140	140
	8	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	139	139	139	139	139	139	139	139	139	139
	9	16	35	44	42	42	55	68	73	74	88	105	121	129	129	129	129	129	129	129	129	129	129
	10	16	35	44	45	45	59	68	72	73	88	100	115	123	123	123	123	123	123	123	123	123	123
	11	16	35	40	42	42	55	64	67	68	81	96	109	118	118	118	118	118	118	118	118	118	118
	12	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	13	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	14	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	15	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	16	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	17	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	18	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	19	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116
	20	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116

**Tabela A.3** – Planilha de Controle relativa ao Caso 7

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

## ANEXO B

---

# Relatório do Programa

\*\* RELATORIO \*\*

SELEÇÃO DINÂMICA DE TABELAS FUZZY AO FINAL DAS FASES

Sendo:

Aproximação 1: app principal  
Aproximação 2: app secundária

Dados de Entrada

Qi1= 15  
Qi2= 15  
TC1=0.3333  
TC2=0.1111  
AM1= 4.0  
AM2= 3.0  
Ncont= 30

Resultados

Início da Fase 1. - Ciclo 1  
App 2 recebendo vermelho

$$Qfa=Qia+Aa-Da \quad Qia= 15$$
$$Qfb=Qib+Ab \quad Qib= 15$$

NUM.EXT= 0 Qfb= 16 Qfa= 13 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 17 Qfa= 11 Aa= 7 Ab= 2 Da= 11 E= 11.6 Verde\_A= 21.60 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 19 Qfa= 10 Aa= 11 Ab= 4 Da= 16 E= 10.8 Verde\_A= 32.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 20 Qfa= 8 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 9.4 Verde\_A= 41.80 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 20 Qfa= 7 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 6.6 Verde\_A= 48.40 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 21 Qfa= 7 Aa= 19 Ab= 6 Da= 27 E= 6.5 Verde\_A= 54.90 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 27  
Fila Residual do Verde= 7  
Fila Máxima do Vermelho= 21  
Verde Total em (a)= 54.90

-----  
Início da Fase 2. - Ciclo 1  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 21  
Qib= 7

NUM.EXT= 0 Qfb= 10 Qfa= 17 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 14 Qfa= 12 Aa= 2 Ab= 7 Da= 11 E= 12.3 Verde\_A= 22.30 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 18 Qfa= 8 Aa= 4 Ab= 11 Da= 17 E= 11.6 Verde\_A= 33.90 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 21 Qfa= 6 Aa= 5 Ab= 14 Da= 20 E= 6.6 Verde\_A= 40.50 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 23 Qfa= 3 Aa= 5 Ab= 16 Da= 23 E= 6.3 Verde\_A= 46.80 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 25 Qfa= 2 Aa= 6 Ab= 18 Da= 25 E= 4.1 Verde\_A= 50.90 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 6  
Partida Total de (a)= 25  
Fila Residual do Verde= 2  
Fila Máxima do Vermelho= 25  
Verde Total em (a)= 50.90

-----  
Início da Fase 3. - Ciclo 2

App 2 recebendo vermelho

Qia= 25

Qib= 2

NUM.EXT= 0 Qfb= 3 Qfa= 23 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 5 Qfa= 21 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 7 Qfa= 18 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 15.0 Verde\_A= 41.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 8 Qfa= 15 Aa= 18 Ab= 6 Da= 28 E= 14.0 Verde\_A= 55.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 10 Qfa= 13 Aa= 23 Ab= 8 Da= 35 E= 13.9 Verde\_A= 69.10 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 11 Qfa= 12 Aa= 28 Ab= 9 Da= 41 E= 12.3 Verde\_A= 81.40 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 28

Partida Total de (a)= 41

Fila Residual do Verde= 12

Fila Máxima do Vermelho= 11

Verde Total em (a)= 81.40

-----

Início da Fase 4. - Cilo 2

App 1 recebendo vermelho

Qia= 11

Qib= 12

NUM.EXT= 0 Qfb= 15 Qfa= 7 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 18 Qfa= 5 Aa= 2 Ab= 6 Da= 8 E= 6.5 Verde\_A= 16.50 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 19 Qfa= 2 Aa= 2 Ab= 7 Da= 11 E= 5.4 Verde\_A= 21.90 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 21 Qfa= 1 Aa= 3 Ab= 9 Da= 13 E= 3.9 Verde\_A= 25.80 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 22 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 10 Da= 15 E= 3.3 Verde\_A= 29.10 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 23 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 11 Da= 16 E= 1.6 Verde\_A= 31.10 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 3

Partida Total de (a)= 16

Fila Residual do Verde= 0

Fila Máxima do Vermelho= 23

Verde Total em (a)= 31.10

-----

Início da Fase 5. - Cilo 3

App 2 recebendo vermelho

Qia= 23

Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 21 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 19 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 5 Qfa= 16 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 16.2 Verde\_A= 42.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 6 Qfa= 13 Aa= 19 Ab= 6 Da= 29 E= 15.0 Verde\_A= 57.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 8 Qfa= 11 Aa= 24 Ab= 8 Da= 36 E= 14.3 Verde\_A= 71.70 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 9 Qfa= 10 Aa= 29 Ab= 9 Da= 42 E= 12.3 Verde\_A= 84.00 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 29

Partida Total de (a)= 42

Fila Residual do Verde= 10

Fila Máxima do Vermelho= 9

Verde Total em (a)= 84.00

-----

Início da Fase 6. - Cilo 3  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 9  
Qib= 10

NUM.EXT= 0 Qfb= 13 Qfa= 5 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 15 Qfa= 3 Aa= 2 Ab= 5 Da= 8 E= 5.4 Verde\_A= 15.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 17 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 4.1 Verde\_A= 19.50 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 18 Qfa= 1 Aa= 3 Ab= 8 Da= 11 E= 3.3 Verde\_A= 22.80 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 19 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 9 Da= 13 E= 3.3 Verde\_A= 26.10 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 20 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 10 Da= 14 E= 1.6 Verde\_A= 28.10 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 3  
Partida Total de (a)= 14  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 20  
Verde Total em (a)= 28.10

-----  
Início da Fase 7. - Cilo 4  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 20  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 18 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 16 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 5 Qfa= 13 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 16.2 Verde\_A= 42.40 Tabela= 4

NUM.EXT= 3 Qfb= 6 Qfa= 10 Aa= 19 Ab= 6 Da= 29 E= 15.0 Verde\_A= 57.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 8 Qfa= 9 Aa= 23 Ab= 8 Da= 34 E= 10.7 Verde\_A= 68.10 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 9 Qfa= 8 Aa= 27 Ab= 9 Da= 39 E= 9.0 Verde\_A= 77.10 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 27  
Partida Total de (a)= 39  
Fila Residual do Verde= 8  
Fila Máxima do Vermelho= 9  
Verde Total em (a)= 77.10

-----  
Início da Fase 8. - Cilo 4  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 9  
Qib= 8

NUM.EXT= 0 Qfb= 11 Qfa= 5 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 13 Qfa= 3 Aa= 2 Ab= 5 Da= 8 E= 5.5 Verde\_A= 15.50 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 15 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 4.1 Verde\_A= 19.60 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 16 Qfa= 1 Aa= 3 Ab= 8 Da= 11 E= 3.3 Verde\_A= 22.90 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 17 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 9 Da= 13 E= 3.3 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 18 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 10 Da= 14 E= 1.6 Verde\_A= 28.20 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 3  
Partida Total de (a)= 14  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 18  
Verde Total em (a)= 28.20



-----

Início da Fase 9. - Cilo 5  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 18  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 16 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 14 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 5 Qfa= 11 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 16.2 Verde\_A= 42.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 6 Qfa= 8 Aa= 18 Ab= 6 Da= 28 E= 12.9 Verde\_A= 55.30 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 7 Qfa= 7 Aa= 21 Ab= 7 Da= 32 E= 7.9 Verde\_A= 63.20 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 8 Qfa= 8 Aa= 25 Ab= 8 Da= 35 E= 7.3 Verde\_A= 70.50 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 25  
Partida Total de (a)= 35  
Fila Residual do Verde= 8  
Fila Máxima do Vermelho= 8  
Verde Total em (a)= 70.50

-----

Início da Fase 10. - Cilo 5  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 8  
Qib= 8

NUM.EXT= 0 Qfb= 11 Qfa= 4 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1

NUM.EXT= 1 Qfb= 13 Qfa= 3 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 14 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 4.3 Verde\_A= 18.40 Tabela= 1  
NUM.EXT= 3 Qfb= 15 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 11 E= 3.2 Verde\_A= 21.60 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 4 Qfb= 17 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 9 Da= 12 E= 1.6 Verde\_A= 23.60 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 3  
Partida Total de (a)= 12  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 17  
Verde Total em (a)= 23.60

-----

Início da Fase 11. - Cilo 6  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 17  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 15 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 13 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 5 Qfa= 10 Aa= 14 Ab= 5 Da= 21 E= 16.2 Verde\_A= 42.40 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 6 Qfa= 8 Aa= 18 Ab= 6 Da= 27 E= 11.6 Verde\_A= 54.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 7 Qfa= 7 Aa= 21 Ab= 7 Da= 31 E= 7.9 Verde\_A= 61.90 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 8 Qfa= 6 Aa= 24 Ab= 8 Da= 35 E= 7.3 Verde\_A= 69.20 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 24  
Partida Total de (a)= 35  
Fila Residual do Verde= 6  
Fila Máxima do Vermelho= 8

Verde Total em (a)= 69.20

-----

Início da Fase 12. - Cilo 6

App 1 recebendo vermelho

Qia= 8

Qib= 6

NUM.EXT= 0 Qfb= 9 Qfa= 4 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1

NUM.EXT= 1 Qfb= 11 Qfa= 3 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1

NUM.EXT= 2 Qfb= 12 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 4.3 Verde\_A= 18.40 Tabela= 1

NUM.EXT= 3 Qfb= 13 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 11 E= 3.2 Verde\_A= 21.60 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 4 Qfb= 15 Qfa= 0 Aa= 3 Ab= 9 Da= 12 E= 1.6 Verde\_A= 23.60 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 3

Partida Total de (a)= 12

Fila Residual do Verde= 0

Fila Máxima do Vermelho= 15

Verde Total em (a)= 23.60

-----

Início da Fase 13. - Cilo 7

App 2 recebendo vermelho

Qia= 15

Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 13 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4

NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 11 Aa= 9 Ab= 3 Da= 13 E= 16.2 Verde\_A= 26.20 Tabela= 4

NUM.EXT= 2 Qfb= 5 Qfa= 9 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 14.6 Verde\_A= 40.80 Tabela= 4

NUM.EXT= 3 Qfb= 6 Qfa= 6 Aa= 17 Ab= 6 Da= 26 E= 10.2 Verde\_A= 51.00 Tabela= 4

NUM.EXT= 4 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 29 E= 6.8 Verde\_A= 57.80 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 7 Qfa= 5 Aa= 22 Ab= 7 Da= 32 E= 5.9 Verde\_A= 63.70 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 22

Partida Total de (a)= 32

Fila Residual do Verde= 5

Fila Máxima do Vermelho= 7

Verde Total em (a)= 63.70

-----

Início da Fase 14. - Cilo 7

App 1 recebendo vermelho

Qia= 7

Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 3 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1

NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 2 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.3 Verde\_A= 14.30 Tabela= 1

NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 4.1 Verde\_A= 18.40 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 3 Qfb= 13 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 8 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 20.40 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2

Partida Total de (a)= 10

Fila Residual do Verde= 0

Fila Máxima do Vermelho= 13

Verde Total em (a)= 20.40

-----

Início da Fase 15. - Cilo 8  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 13  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 11 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 9 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 14.6 Verde\_A= 24.60 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 7 Aa= 12 Ab= 4 Da= 18 E= 11.7 Verde\_A= 36.30 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 15 Ab= 5 Da= 22 E= 8.6 Verde\_A= 44.90 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 6 Qfa= 4 Aa= 17 Ab= 6 Da= 26 E= 7.3 Verde\_A= 52.20 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 20 Ab= 6 Da= 28 E= 4.5 Verde\_A= 56.70 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 20  
Partida Total de (a)= 28  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 56.70

-----

Início da Fase 16. - Cilo 8  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1

NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 17. - Cilo 9  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 12  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 26  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 18. - Cilo 9  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 19. - Cilo 10  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 12  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4

NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 26  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 20. - Cilo 10  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 21. - Ciló 11  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 12  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 26  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 52.80

-----  
Início da Fase 22. - Ciló 11  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----  
Início da Fase 23. - Ciló 12  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 12  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 26  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 24. - Ciló 12  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 25. - Ciló 13  
App 2 recebendo vermelho

Qia= 12  
Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19  
Partida Total de (a)= 26  
Fila Residual do Verde= 5  
Fila Máxima do Vermelho= 6  
Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 26. - Ciló 13  
App 1 recebendo vermelho

Qia= 6  
Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde  
NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2  
Partida Total de (a)= 10  
Fila Residual do Verde= 0  
Fila Máxima do Vermelho= 12  
Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 27. - Ciló 14

App 2 recebendo vermelho

Qia= 12

Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19

Partida Total de (a)= 26

Fila Residual do Verde= 5

Fila Máxima do Vermelho= 6

Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 28. - Cilo 14

App 1 recebendo vermelho

Qia= 6

Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1  
NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1  
NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2

Partida Total de (a)= 10

Fila Residual do Verde= 0

Fila Máxima do Vermelho= 12

Verde Total em (a)= 19.30

-----

Início da Fase 29. - Cilo 15

App 2 recebendo vermelho

Qia= 12

Qib= 0

NUM.EXT= 0 Qfb= 1 Qfa= 10 Aa= 3 Ab= 1 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 4  
NUM.EXT= 1 Qfb= 3 Qfa= 8 Aa= 8 Ab= 3 Da= 12 E= 13.2 Verde\_A= 23.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 2 Qfb= 4 Qfa= 6 Aa= 11 Ab= 4 Da= 17 E= 10.0 Verde\_A= 33.20 Tabela= 4  
NUM.EXT= 3 Qfb= 5 Qfa= 6 Aa= 14 Ab= 5 Da= 20 E= 7.5 Verde\_A= 40.70 Tabela= 4  
NUM.EXT= 4 Qfb= 5 Qfa= 4 Aa= 16 Ab= 5 Da= 24 E= 7.3 Verde\_A= 48.00 Tabela= 4

AJUSTE para Caso 1 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 5 Qfb= 6 Qfa= 5 Aa= 19 Ab= 6 Da= 26 E= 4.8 Verde\_A= 52.80 Tabela= 1

Total a ser atendido em (A)= 19

Partida Total de (a)= 26

Fila Residual do Verde= 5

Fila Máxima do Vermelho= 6

Verde Total em (a)= 52.80

-----

Início da Fase 30. - Cilo 15

App 1 recebendo vermelho

Qia= 6

Qib= 5

NUM.EXT= 0 Qfb= 8 Qfa= 2 Aa= 1 Ab= 3 Da= 5 E= 0.0 Verde\_A= 10.00 Tabela= 1

NUM.EXT= 1 Qfb= 10 Qfa= 1 Aa= 2 Ab= 5 Da= 7 E= 4.1 Verde\_A= 14.10 Tabela= 1

NUM.EXT= 2 Qfb= 11 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 6 Da= 9 E= 3.2 Verde\_A= 17.30 Tabela= 1

AJUSTE para Caso 4 --> Altera as extensões de verde da app que vai receber verde

NUM.EXT= 3 Qfb= 12 Qfa= 0 Aa= 2 Ab= 7 Da= 10 E= 1.6 Verde\_A= 19.30 Tabela= 4

Total a ser atendido em (A)= 2

Partida Total de (a)= 10

Fila Residual do Verde= 0

Fila Máxima do Vermelho= 12

Verde Total em (a)= 19.30



Tabelas de Resultados

**Tabela C.1 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Baixo e Fluxo Fixo**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	12	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit2	Fila Residual	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	32,1	21	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
	Tempo Verde	28,9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit3	Fila Residual	17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	11	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	40,7	33,9	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
	Tempo Verde	39,9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	12	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit2	Fila Residual	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	31,9	21,4	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	30,3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit3	Fila Residual	17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	42,5	33,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	41,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	12	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	30,4	23,5	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	27,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit3	Fila Residual	17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	11	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	38	33,3	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	39,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.2 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Médio e Fluxo Fixo**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	12	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit2	Fila Residual	13	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	12	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	34	41,1	27,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
	Tempo Verde	34,1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit3	Fila Residual	19	4	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	16	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	45,2	53,6	30,1	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9
	Tempo Verde	45	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit1	Fila Residual	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	12	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit2	Fila Residual	13	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	35,3	45	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	35,6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit3	Fila Residual	19	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	17	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	47,7	59,2	34,1	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	46,3	15,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit1	Fila Residual	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	12	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	13	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	12	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	32,9	39,3	29,4	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	33,6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit3	Fila Residual	18	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	16	10	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	42	48,9	35	27,1	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	40,2	15	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.3 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Alto e Fluxo Fixo**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Tempo Verde	12	32,6	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit2	Fila Residual	14	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	18	17	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Tempo Verde	38,5	68	65,9	57,9	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2
	Tempo Verde	36,9	23,6	20,4	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
tab1 - sit3	Fila Residual	21	11	9	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	25	23	20	18	17	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Tempo Verde	52	82,4	80,5	74,3	68	65,9	57,9	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2	50,2
	Tempo Verde	50,5	30,8	24,4	23,8	23,6	20,4	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
tab4 - sit1	Fila Residual	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Tempo Verde	12	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit2	Fila Residual	14	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	18	17	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Tempo Verde	39,2	70,5	69,2	63,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7
	Tempo Verde	37,8	23,6	23,7	20,6	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9
tab4 - sit3	Fila Residual	21	11	9	9	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	25	23	20	18	17	15	13	13	13	13	13	13	13	13	13
	Tempo Verde	54,9	81,4	84	77,1	70,5	69,2	63,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7	56,7
	Tempo Verde	50,9	31,1	28,1	28,2	23,6	23,7	20,6	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9	19,9
tab7 - sit1	Fila Residual	1	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Tempo Verde	12	30,8	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3	33,3
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	14	8	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Fila Residual	18	18	17	15	14	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Tempo Verde	33,4	61,9	62	58,4	51,9	48,3	45	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
	Tempo Verde	34,5	23,6	20,2	18,8	18,8	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
tab7 - sit3	Fila Residual	20	11	9	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5
	Fila Residual	24	23	20	19	18	17	15	14	13	12	12	12	12	12	12
	Tempo Verde	46,3	75,1	77	68,6	64,5	62	58,4	51,9	48,3	45	43,5	43,5	43,5	43,5	43,5
	Tempo Verde	43,9	29,8	24,3	23,6	20,2	20,2	18,8	18,8	15	15	15	15	15	15	15

**Tabela C.4** – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo e Fluxo Fixo

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	12	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit2	Fila Residual	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	32,1	21	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	30,3	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit3	Fila Residual	17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	10	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	42,5	33,5	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15	15
	Tempo Verde	41,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	12	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit2	Fila Residual	12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	7	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	30,4	21,4	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	30	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit3	Fila Residual	17	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	11	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Tempo Verde	38	34,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5
	Tempo Verde	39,6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.5 – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio e Fluxo Fixo**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	12	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit2	Fila Residual	13	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	34	45	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	35,6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit3	Fila Residual	19	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	17	8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	47,7	59,2	31,6	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2	23,2
	Tempo Verde	46,3	15,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit1	Fila Residual	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	12	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit2	Fila Residual	13	4	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	12	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	32,9	45	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	33,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit3	Fila Residual	18	5	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	Fila Residual	16	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Tempo Verde	42	57,7	30,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2	21,2
	Tempo Verde	41,6	15,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.6 – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto e Fluxo Fixo**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
	Tempo Verde	12	32,6	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5	33,5
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit2	Fila Residual	14	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	19	17	15	13	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	Tempo Verde	38,5	74,4	69,2	63,7	56,7	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8
	Tempo Verde	37,7	23,6	23,6	20,4	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
Fase - sit3	Fila Residual	21	11	9	9	8	8	7	6	6	6	6	6	6	6	6
	Fila Residual	25	23	20	18	17	15	13	12	12	12	12	12	12	12	12
	Tempo Verde	54,9	81,4	84	77,1	70,5	69,2	63,7	56,7	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8	52,8
	Tempo Verde	50,9	31,1	28,1	28,2	23,6	23,6	20,4	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3	19,3
Ext - sit1	Fila Residual	1	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
	Tempo Verde	12	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4	33,4
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit2	Fila Residual	14	9	7	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5	5	5
	Fila Residual	18	17	15	14	13	12	11	9	9	9	9	9	9	9	9
	Tempo Verde	33,4	67,8	66,9	62,7	59,1	56	51,9	49,1	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3
	Tempo Verde	34,5	24,1	20,2	20,2	20,1	19,1	19,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
Ext - sit3	Fila Residual	20	11	9	8	8	7	7	6	6	5	5	5	5	5	5
	Fila Residual	24	24	20	18	16	14	13	12	11	8,9	9	9	9	9	9
	Tempo Verde	46,3	74,8	82,1	74,3	69,8	64,3	59,1	56	51,9	49,1	42,3	42,3	42,3	42,3	42,3
	Tempo Verde	43,9	29,5	24,3	23,6	23,6	20,2	20,1	19,1	19,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2

**Tabela C.7 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Baixo e Fluxo Variável**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	12	15,2	12	12	15,2	19,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	12	12	12
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit2	Fila Residual	13	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	8	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	34,5	27,5	12	12	15,2	19,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	12	12	12
	Tempo Verde	29,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit3	Fila Residual	18	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	12	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	44,9	35,7	12	12	15,2	19,3	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	12	12	12
	Tempo Verde	41,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	12	15,5	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit2	Fila Residual	13	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	8	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	35,2	23,2	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	32	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit3	Fila Residual	19	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	11	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	47,7	34,9	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	44,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	12	15	12	12	15	21,8	15	15	15	15	15	15	12	12	12
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	12	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	8	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	32	27,3	12	12	15	21,8	15	15	15	15	15	15	12	12	12
	Tempo Verde	27,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit3	Fila Residual	18	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	13	5	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	40,9	36,5	15	12	15	21,8	15	15	15	15	15	15	12	12	12
	Tempo Verde	39,6	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12



**Tabela C.8 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Médio e Fluxo Variável**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	2	2	1	2	2	2	3	2	2	3	3	1	2	3
	Fila Residual	5	5	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	12	19,3	19,3	15,2	28	30	23,9	28	23,4	19,3	27,6	27,6	15,2	19,3	23,4
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit2	Fila Residual	14	4	2	1	2	2	2	3	2	2	3	3	1	2	3
	Fila Residual	13	6	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	37,6	43,1	20,7	15,2	28	30	23,9	28	23,4	19,3	27,6	27,6	15,2	19,3	23,4
	Tempo Verde	35,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab1 - sit3	Fila Residual	20	7	3	1	2	2	2	3	2	2	3	3	1	2	3
	Fila Residual	19	9	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	50,9	59,2	30,4	15,2	28	30	23,9	28	23,4	19,3	27,6	27,6	15,2	19,3	23,4
	Tempo Verde	46,2	19,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit1	Fila Residual	1	3	2	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	5	5	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	12	24,3	19,9	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit2	Fila Residual	14	5	2	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	13	6	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	39,1	46,5	21,2	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	37,4	15,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab4 - sit3	Fila Residual	21	7	3	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	19	9	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	54,9	64,2	32,2	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	49	20	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit1	Fila Residual	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	5	5	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	12	21,8	18,8	15	28	29,7	23,2	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	13	4	2	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	13	8	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	33,4	39,8	25,4	15	28	29,7	23,2	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	31,9	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit3	Fila Residual	20	8	3	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	19	11	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	46,1	55,1	34,7	15	28	29,7	23,2	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	43,2	20,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.9 – Resultados de Simulação para Controle Semafórico *Fuzzy* convencional, Volume Alto e Fluxo Variável**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
tab1 - sit1	Fila Residual	1	4	3	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5
	Fila Residual	6	6	6	6	8	9	8	9	9	9	11	12	10	10	11
	Tempo Verde	12	31,7	29,1	31,2	32,9	36,6	37,8	36,6	37,8	36,6	39,9	46,2	47,1	38,6	39,9
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
tab1 - sit2	Fila Residual	15	8	7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	Fila Residual	19	17	13	11	11	12	11	11	11	10	11	12	10	10	11
	Tempo Verde	39,5	70,1	62,7	49,3	45	45	45	45	43,8	43,7	43,8	46,2	47,1	38,6	39,9
	Tempo Verde	38,8	23,6	20,4	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2
tab1 - sit3	Fila Residual	22	12	9	8	7	7	6	7	6	6	7	7	6	6	6
	Fila Residual	27	25	20	17	16	16	14	13	14	14	15	15	14	12	13
	Tempo Verde	56	84,8	80,5	72,9	67,9	66,6	60,3	57,4	50,2	52,5	58,8	62,4	56,3	51,6	47,9
	Tempo Verde	52,1	31,6	27,6	23,4	20,4	20,4	19,3	20,4	19,3	19,3	20,4	20,4	19,3	19,3	19,3
tab4 - sit1	Fila Residual	1	4	3	3	4	4	3	4	4	4	4	5	5	5	5
	Fila Residual	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	10	10	9	10
	Tempo Verde	12	33,4	29,7	32,1	35	35	32,1	35	33,4	32,1	34,5	40,7	44,6	41,9	41,9
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	15,5	15,5	15,5	15,5
tab4 - sit2	Fila Residual	15	9	7	5	5	6	6	7	6	7	7	7	6	6	6
	Fila Residual	19	16	12	10	11	13	12	13	13	12	13	12	12	12	12
	Tempo Verde	42	73,9	62,1	50,5	47,8	50,5	56	58,1	56,7	55,7	58,1	61,5	51,9	48,9	52,5
	Tempo Verde	40,1	25,3	20,6	15,5	15,5	19,9	19,9	20,6	19,9	20,6	20,6	20,6	19,9	19,9	19,9
tab4 - sit3	Fila Residual	22	12	9	8	7	8	7	7	6	7	7	7	6	6	6
	Fila Residual	26	25	19	16	15	16	13	13	13	12	13	12	12	12	12
	Tempo Verde	58,6	80,4	84	72,6	70,8	68,4	67,6	58,9	56,7	55,7	58,1	61,5	51,9	48,9	52,5
	Tempo Verde	51,7	32,3	28,1	23,7	20,1	24	20,6	20,2	19,9	20,6	20,6	20,6	19,9	19,9	19,9
tab7 - sit1	Fila Residual	1	4	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
	Fila Residual	6	7	7	7	9	9	8	8	8	8	9	10	9	8	8
	Tempo Verde	12	30,8	31,8	32,4	32,9	37,6	35,3	35,1	33,9	33,1	35,3	37,6	37,6	34,8	33,9
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
tab7 - sit2	Fila Residual	14	8	6	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5	5	5
	Fila Residual	18	17	14	13	13	13	12	13	12	11	13	15	13	11	11
	Tempo Verde	36,4	61,6	55,7	46,7	48,5	48,5	45	44,3	45	41,7	42,7	48,5	51,2	43,3	40,2
	Tempo Verde	34	23,6	18,8	15	15	15	15	15	15	15	15	18,8	15	15	15
tab7 - sit3	Fila Residual	21	12	9	7	6	7	6	6	5	5	6	6	5	5	5
	Fila Residual	26	25	20	16	17	17	13	14	13	12	14	15	13	11	11
	Tempo Verde	48,6	78,5	77,9	67,1	57,9	62	57,2	48,5	48,3	44,3	46	52,7	51,2	43,3	40,2
	Tempo Verde	45,5	31,7	27,5	19,4	18,8	20,2	15,8	18,8	15	15	18,8	18,8	15	15	15

**Tabela C.10** – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo e Fluxo Variável

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	12,0	15,0	12,0	12,0	15,0	21,8	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	12,0	12,0	12,0
	Tempo Verde	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Fase - sit2	Fila Residual	13	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	8	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	34,5	27,5	12,0	12,0	15,0	21,8	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0	12,0	12,0	12,0
	Tempo Verde	31,7	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0	12,0
Fase - sit3	Fila Residual	19	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	11	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	47,7	34,9	12	12	15	21,8	15	15	15	15	15	15	12	12	12
	Tempo Verde	44,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit1	Fila Residual	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	4	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	12	15,5	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit2	Fila Residual	12	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	8	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	32	23,2	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	29,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit3	Fila Residual	18	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Fila Residual	13	4	1	4	5	5	4	4	5	4	4	2	4	3	5
	Tempo Verde	40,9	39,9	12	12	15,5	19,9	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	15,5	12	12	12
	Tempo Verde	40	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

**Tabela C.11 – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio e Fluxo Variável**

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	5	5	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	12	21,8	18,8	15	28	30	23,9	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit2	Fila Residual	14	5	2	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	13	6	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	37,6	46,5	20,7	15	28	30	23,9	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	37,4	15,2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Fase - sit3	Fila Residual	21	7	3	1	2	2	2	2	2	2	3	3	1	2	2
	Fila Residual	19	9	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	54,9	64,2	30,4	15	28	30	23,9	23,2	21,8	21,8	27,6	27,6	15	15,8	21,8
	Tempo Verde	49	19,8	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit1	Fila Residual	1	3	2	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	5	5	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	12	24,3	19,9	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit2	Fila Residual	13	5	2	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	13	6	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	33,4	46,5	21,2	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	32,5	15,5	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Ext - sit3	Fila Residual	20	8	3	1	2	2	1	3	2	2	3	2	1	2	3
	Fila Residual	19	11	4	5	6	6	5	5	5	5	5	4	5	5	6
	Tempo Verde	46,1	58,5	36,7	15,5	28,2	29,7	21,2	28,2	24,3	19,9	25,1	25,1	15,5	19,9	24,3
	Tempo Verde	43,2	20,7	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12

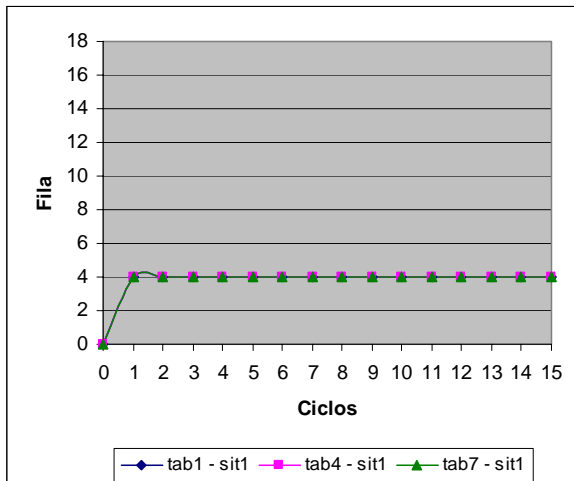
**Tabela C.12** – Resultados de Simulação para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto e Fluxo Variável

		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Fase - sit1	Fila Residual	1	4	3	3	3	4	4	4	4	4	5	6	6	6	6
	Fila Residual	6	6	6	6	8	9	8	9	9	9	11	12	12	11	12
	Tempo Verde	12	31,7	29,1	31,2	32,9	36,6	37,8	36,6	37,8	36,6	39,9	50,4	51,9	48,9	48,9
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	15,2	19,3	19,3	19,3	19,3
Fase - sit2	Fila Residual	15	9	7	5	5	5	5	5	5	4	5	6	6	6	6
	Fila Residual	19	16	12	10	10	11	9	10	9	9	11	12	12	11	12
	Tempo Verde	39,5	73,9	62,1	50,5	47,8	47,6	47,8	40,2	45,9	36,6	39,9	50,4	51,9	48,9	48,9
	Tempo Verde	40,1	25,3	20,4	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	12	15,2	19,3	19,3	19,3	19,3
Fase - sit3	Fila Residual	22	12	9	8	7	8	7	7	6	7	7	7	6	6	6
	Fila Residual	26	25	19	16	15	16	13	13	13	12	13	12	12	11	12
	Tempo Verde	58,6	80,4	84	72,6	70,8	68,4	67,6	58,9	56,7	55,7	58,1	61,5	51,9	48,9	48,9
	Tempo Verde	51,7	32,3	28,1	23,4	20,4	23,6	20,4	20,4	19,3	20,7	20,4	20,4	19,3	19,3	19,3
Ext - sit1	Fila Residual	1	4	3	3	4	4	3	4	4	4	4	5	5	5	5
	Fila Residual	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	10	10	9	10
	Tempo Verde	12	33,4	29,7	32,1	35	35	32,1	35	33,4	32,1	34,5	40,7	44,6	41,6	41,6
	Tempo Verde	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	15,2	15,2	15,2	15,2
Ext - sit2	Fila Residual	14	9	7	5	5	5	5	5	5	5	5	6	5	5	5
	Fila Residual	18	16	12	10	10	11	9	10	9	9	10	11	10	9	10
	Tempo Verde	36,4	67,7	60,7	50,6	47,8	47,7	47,8	43,8	45,7	40,3	43,8	49,1	47,7	41,6	41,6
	Tempo Verde	34	24,3	20,1	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	15,2	19,3	15,2	15,2	15,2
Ext - sit3	Fila Residual	21	12	9	8	7	7	6	7	6	6	7	7	6	6	6
	Fila Residual	26	25	20	17	16	15	12	12	12	12	13	13	12	11	12
	Tempo Verde	48,6	76,8	80,5	72,9	72,2	67,7	60,5	56	51,9	49,2	56	60,1	56	48,8	47,7
	Tempo Verde	45,5	31,7	27,5	23	20,2	20,2	15,8	20,1	19,1	19,1	20,1	20,2	19,1	19,1	19,1

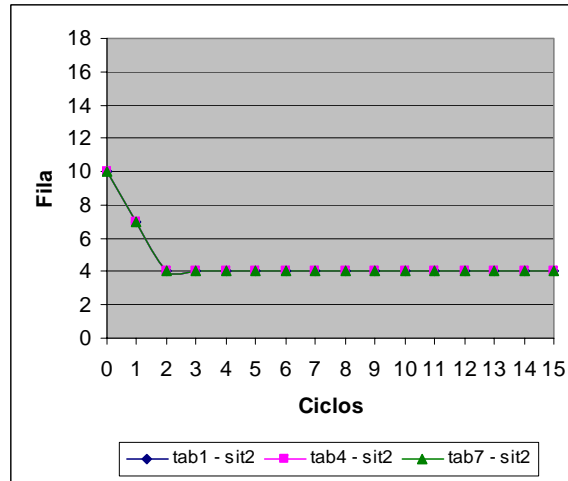
# ANEXO D

---

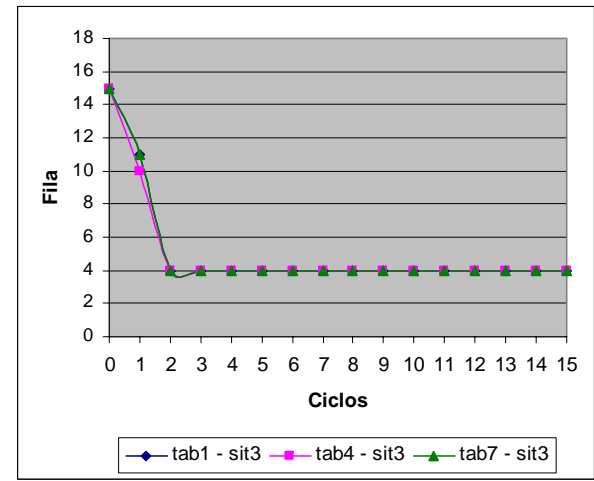
## Estudios Gráficos



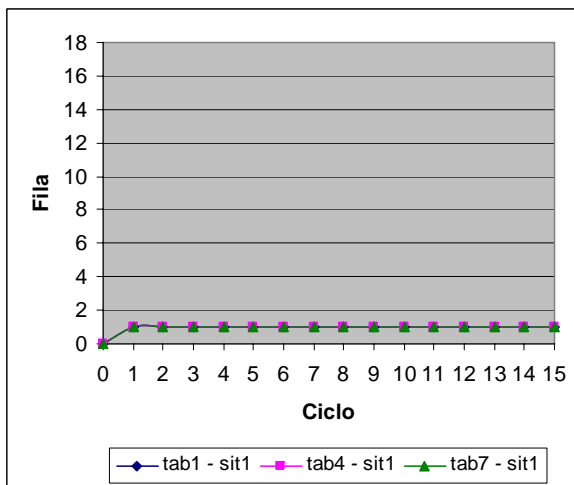
(a) Aproximação Principal, Sit 01



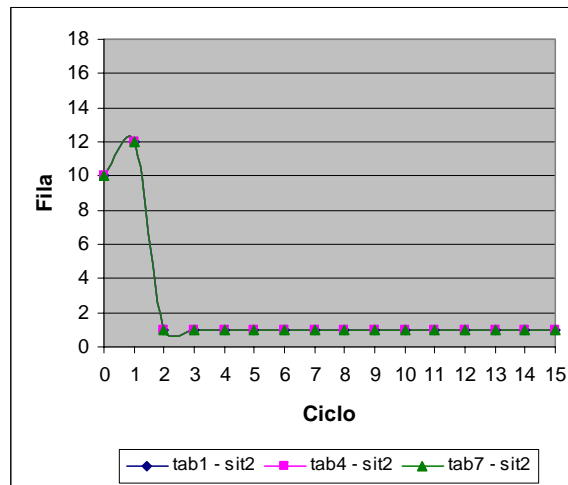
(b) Aproximação Principal, Sit 02



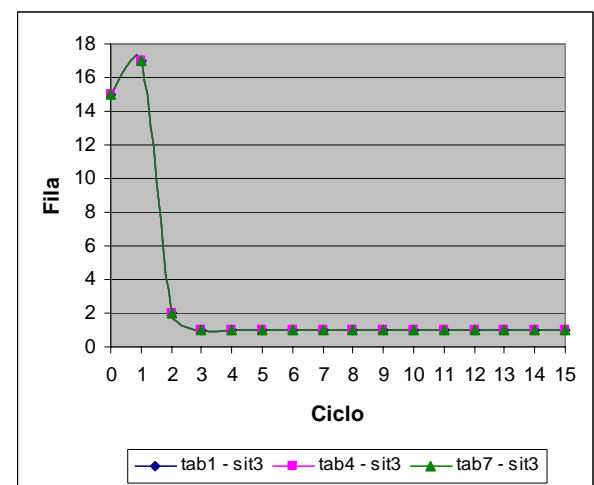
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

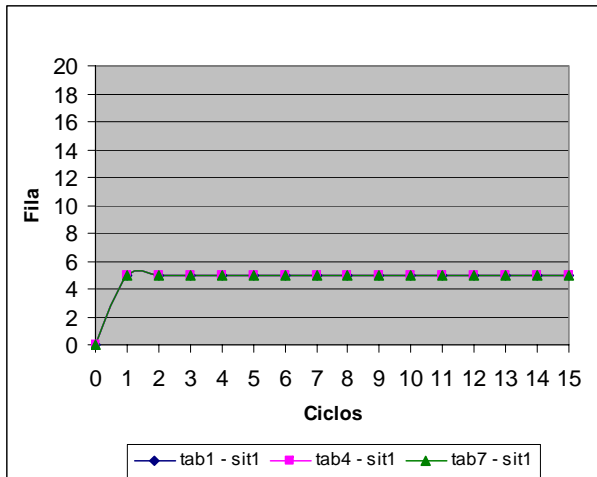


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

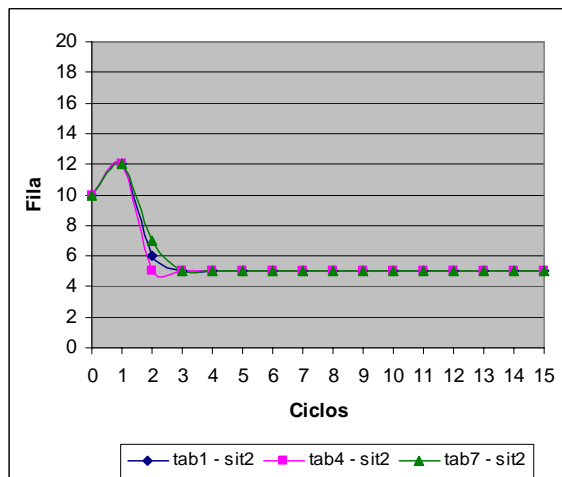


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

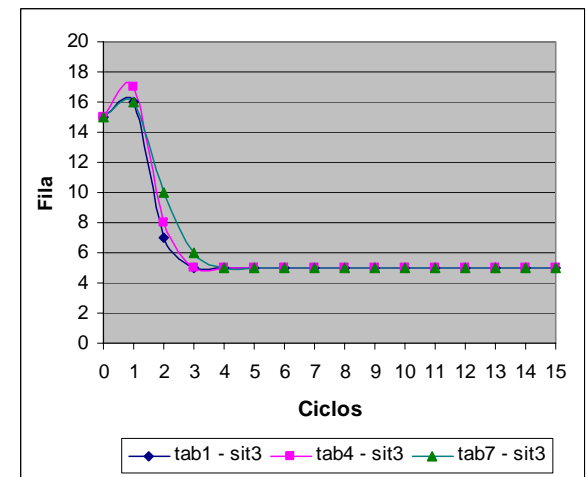
**Figura D.1** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Baixo, Fluxo Fixo



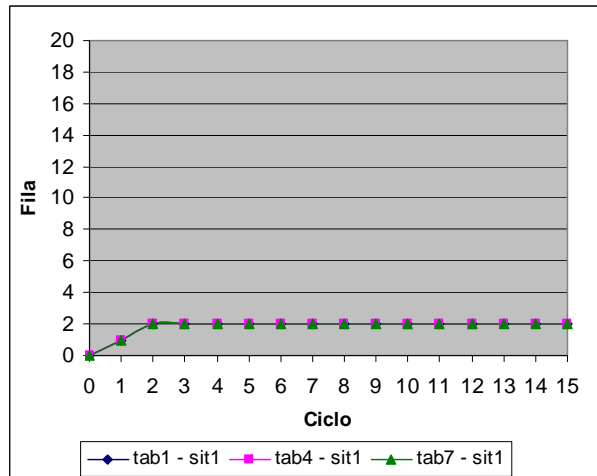
(a) Aproximação Principal, Sit 01



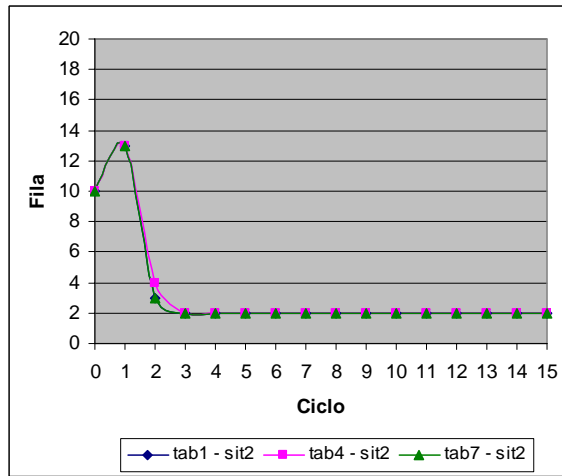
(b) Aproximação Principal, Sit 02



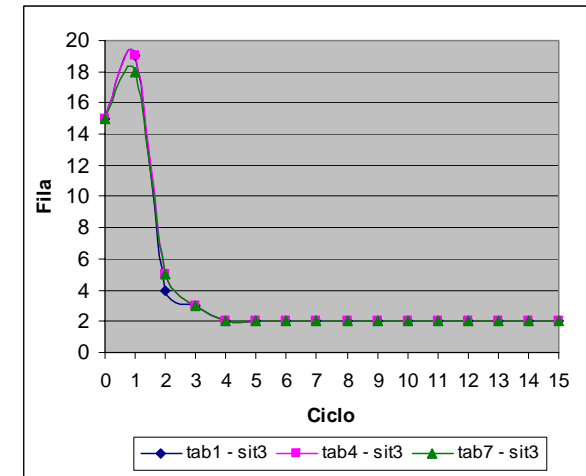
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01



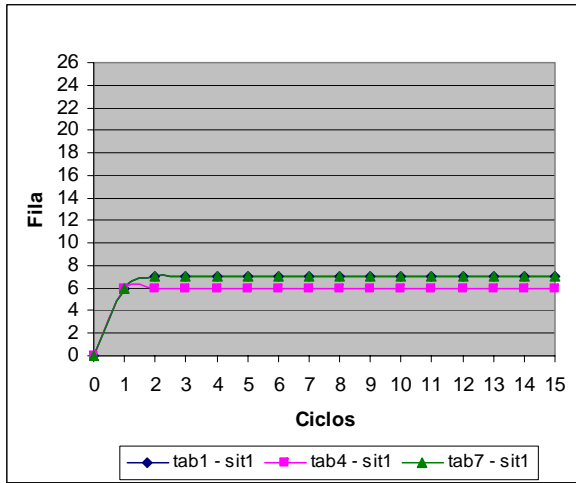
(e) Aproximação Secundária, Sit 02



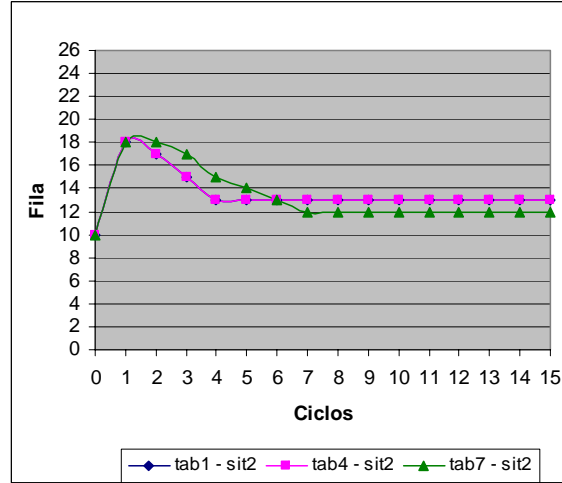
(f) Aproximação Secundária, Sit 03

**Figura D.2** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Médio, Fluxo Fixo

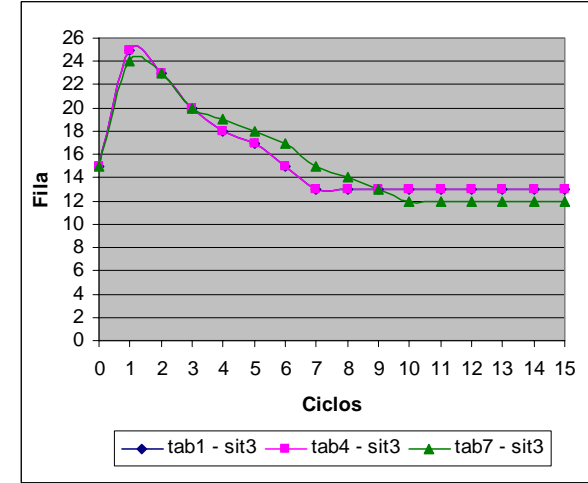




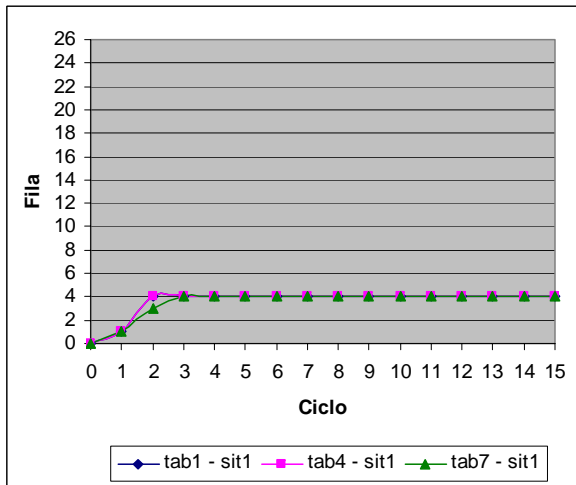
(a) Aproximação Principal, Sit 01



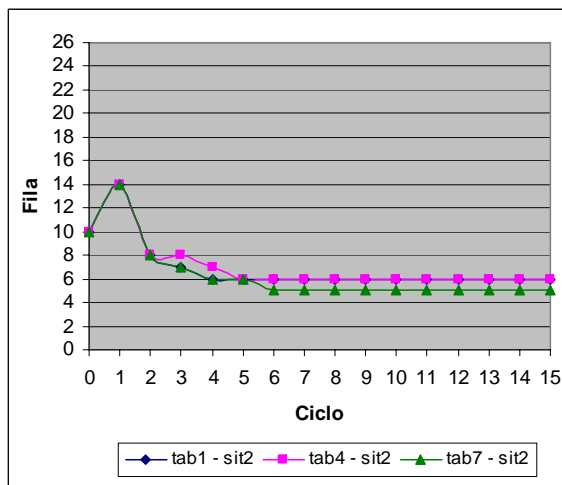
(b) Aproximação Principal, Sit 02



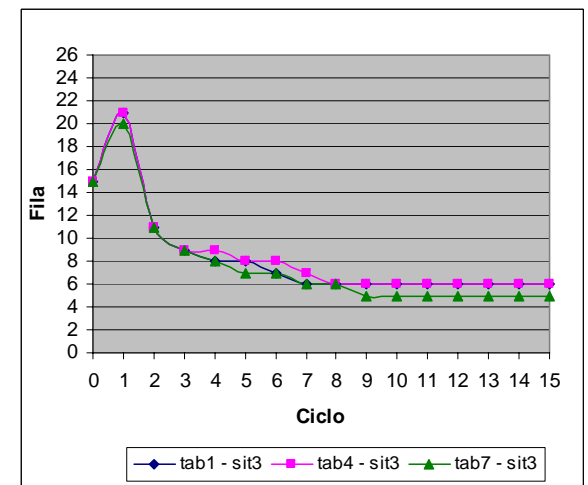
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

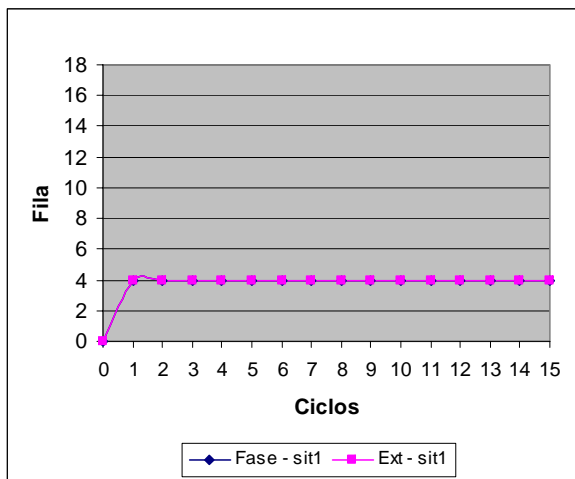


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

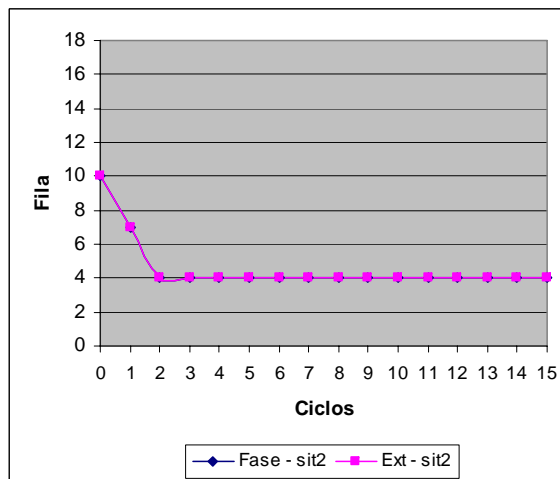


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

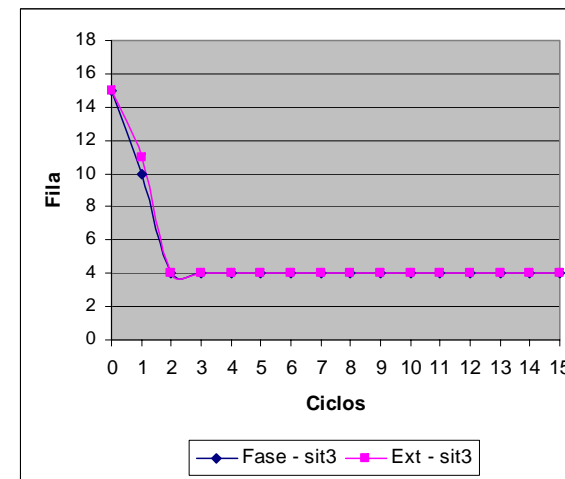
**Figura D.3** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Alto, Fluxo Fixo



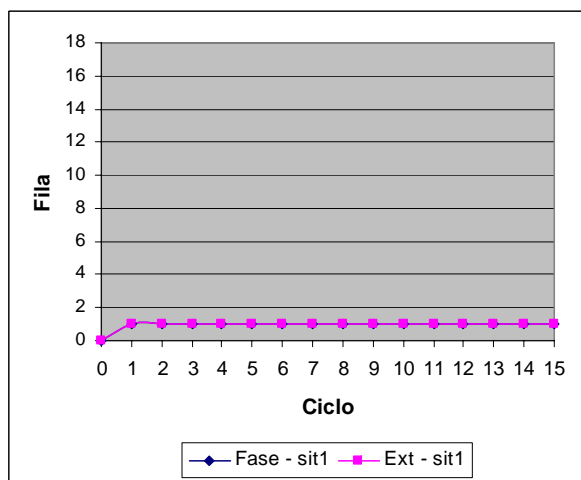
(a) Aproximação Principal, Sit 01



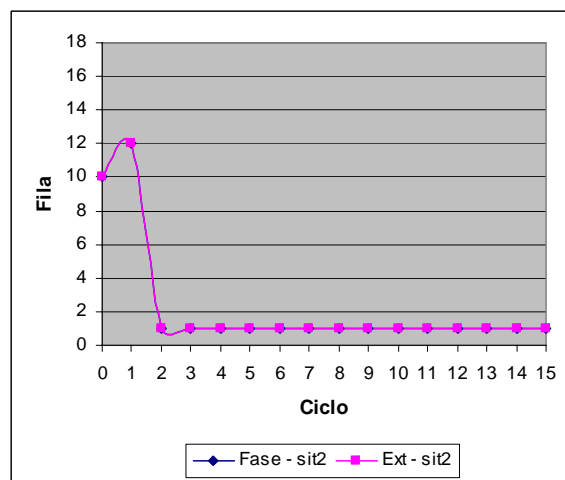
(b) Aproximação Principal, Sit 02



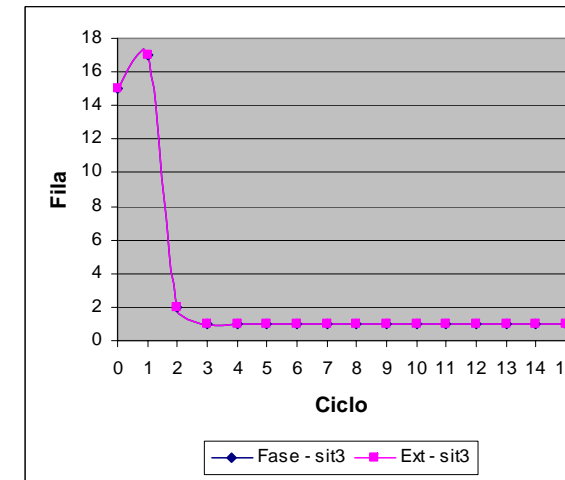
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

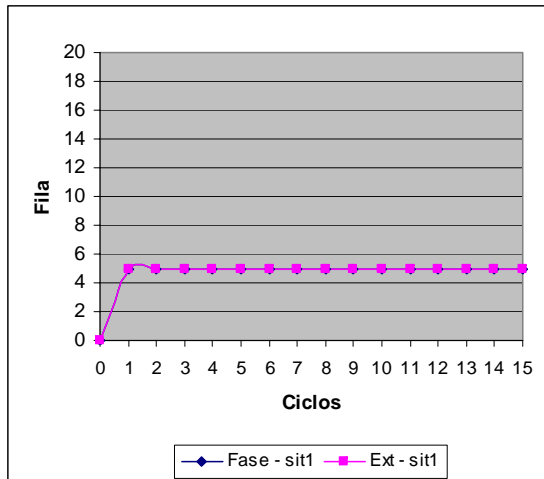


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

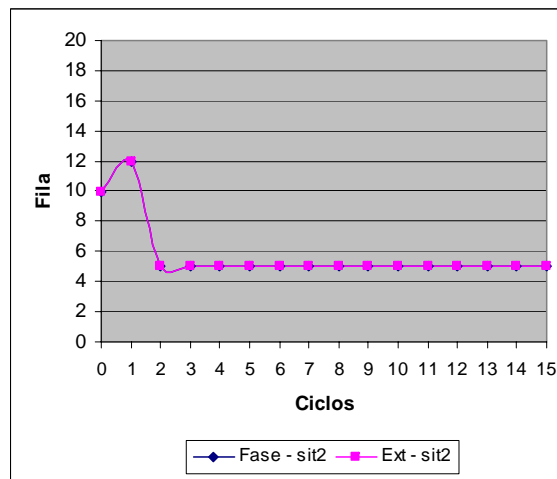


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

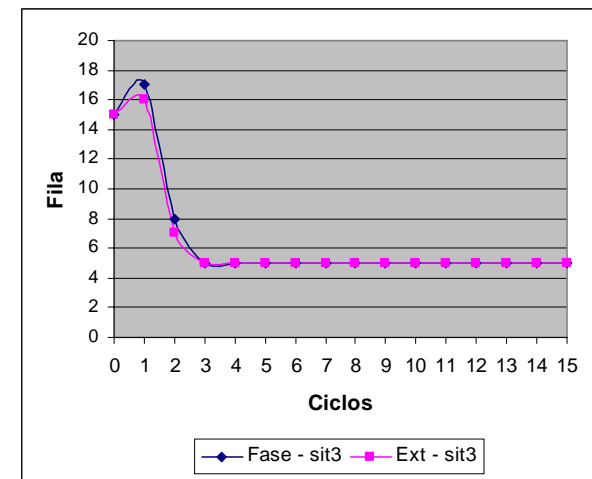
**Figura D.4** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo, Fluxo Fixo



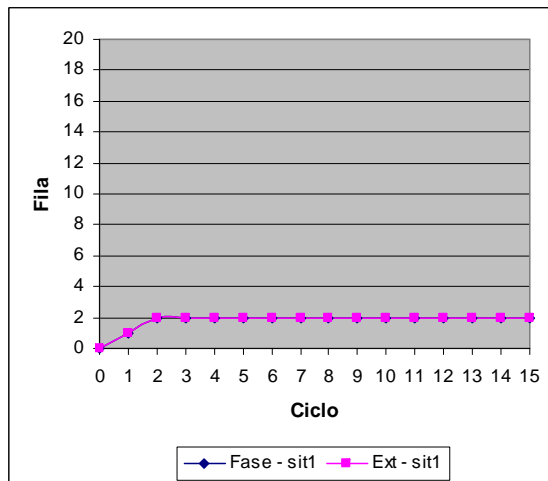
(a) Aproximação Principal, Sit 01



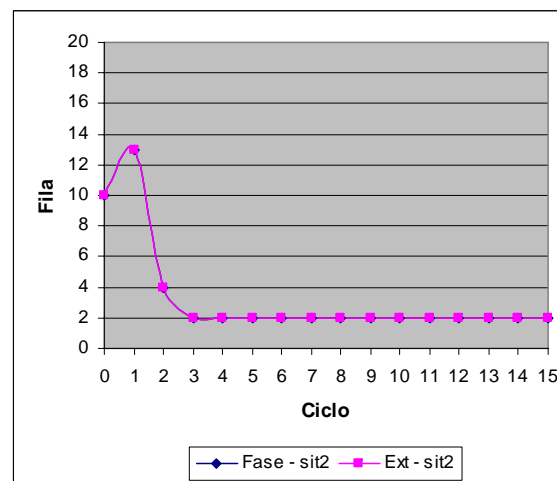
(b) Aproximação Principal, Sit 02



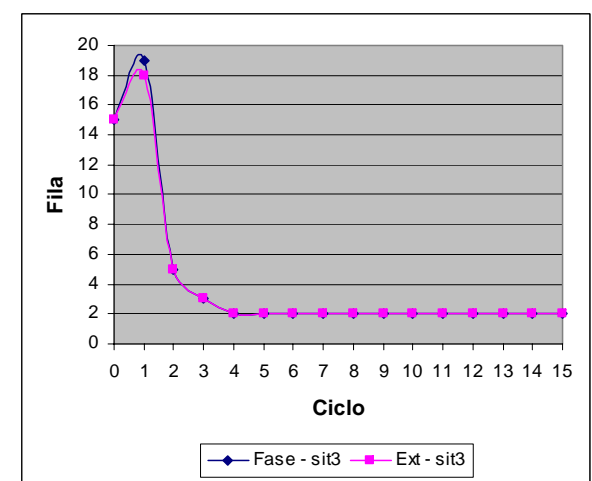
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

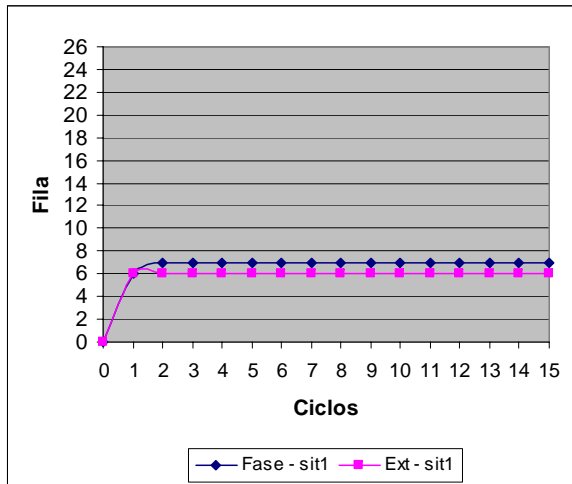


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

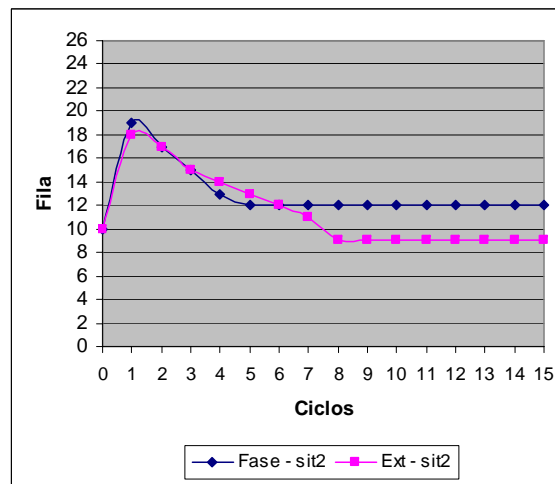


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

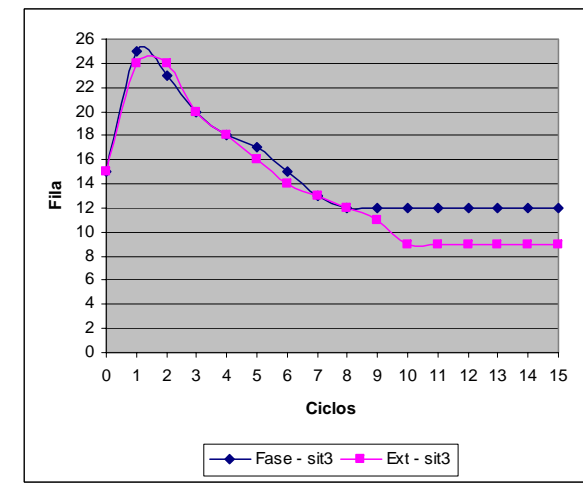
**Figura D.5** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio, Fluxo Fixo



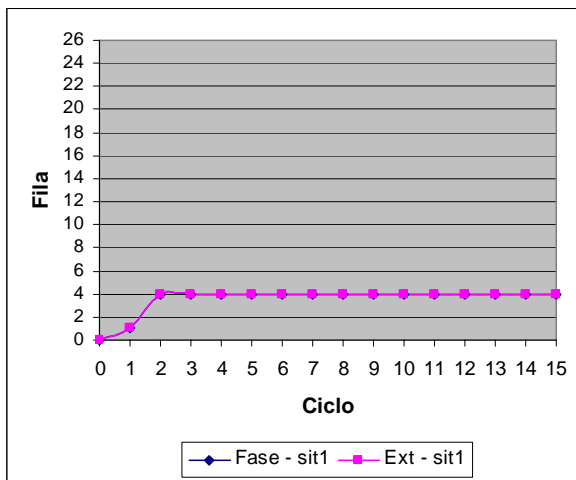
(a) Aproximação Principal, Sit 01



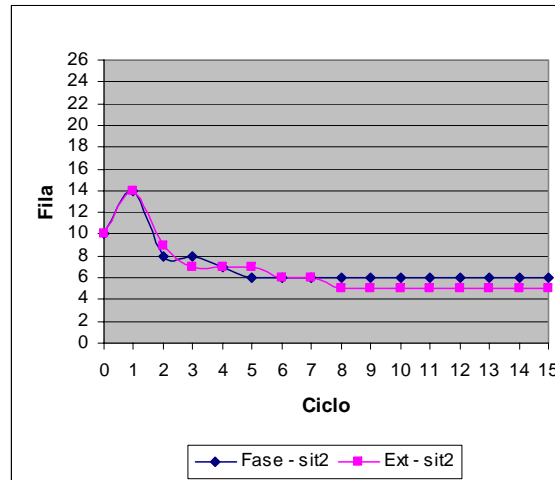
(b) Aproximação Principal, Sit 02



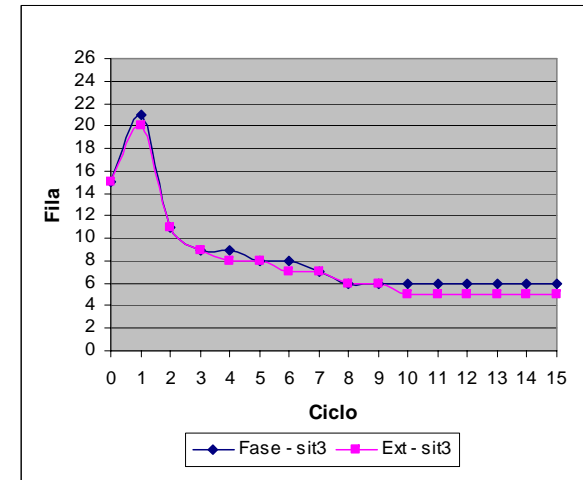
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

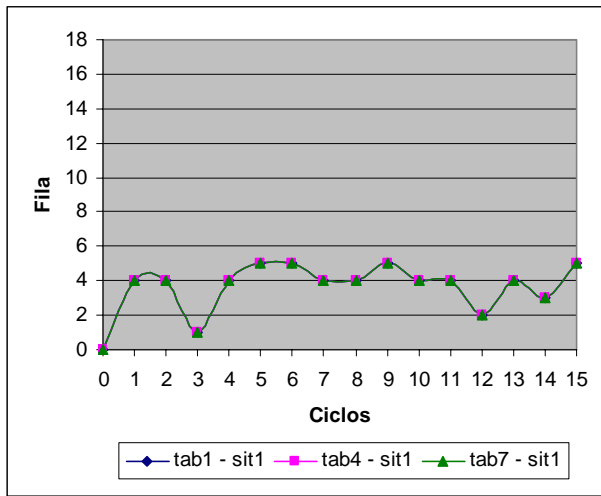


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

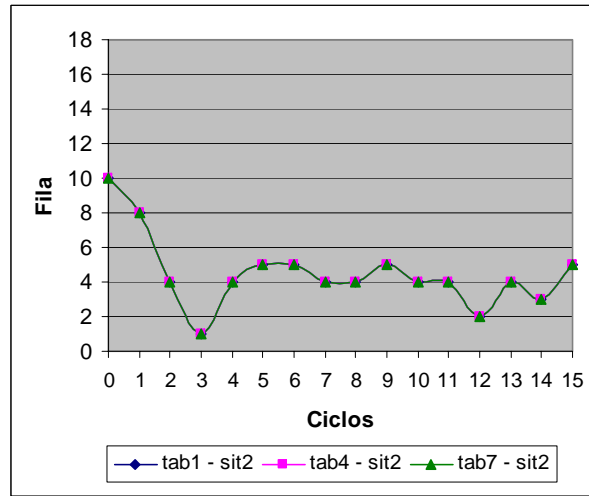


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

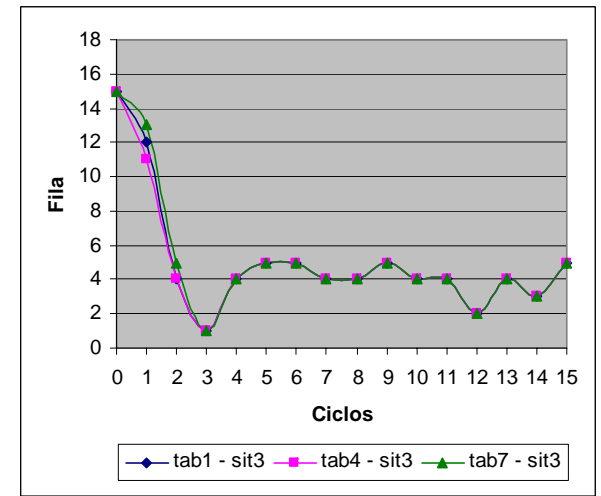
**Figura D.6** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto, Fluxo Fixo



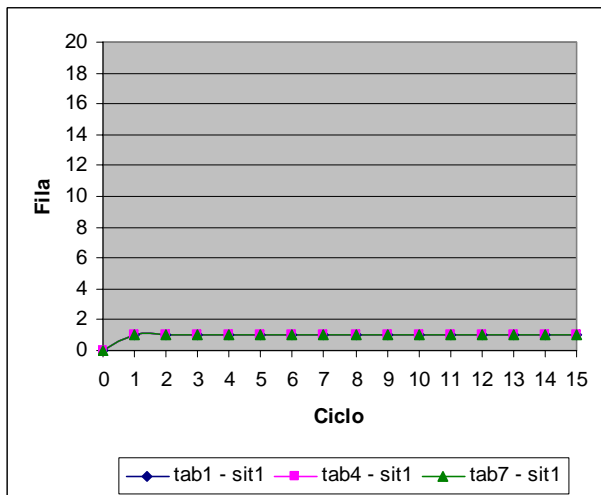
(a) Aproximação Principal, Sit 01



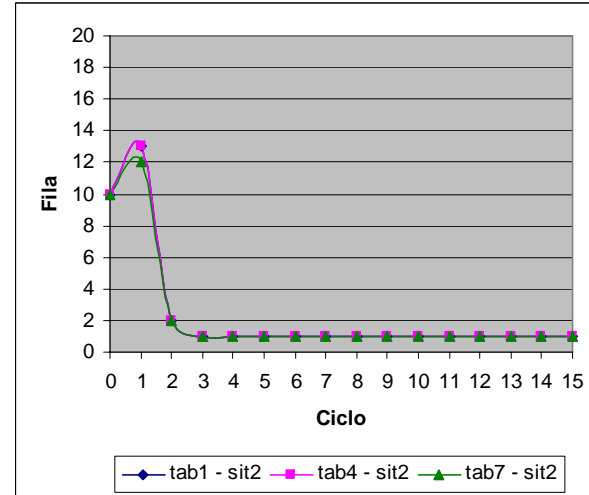
(b) Aproximação Principal, Sit 02



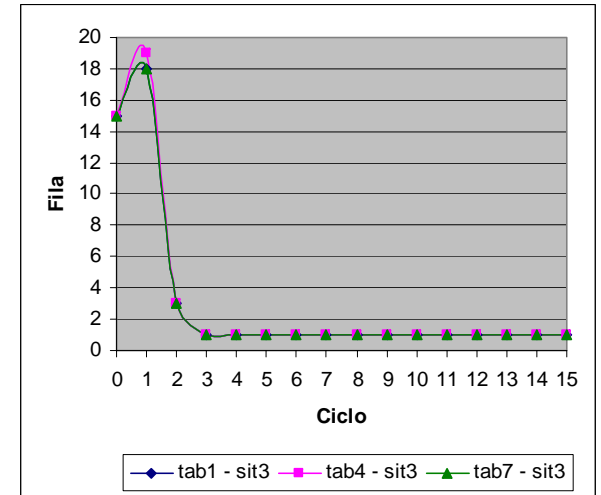
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

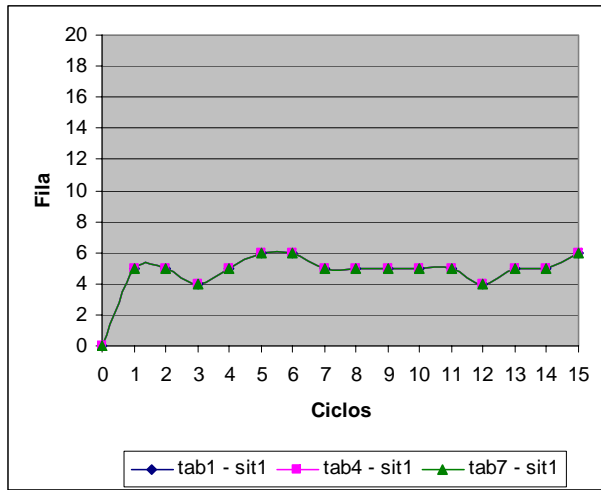


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

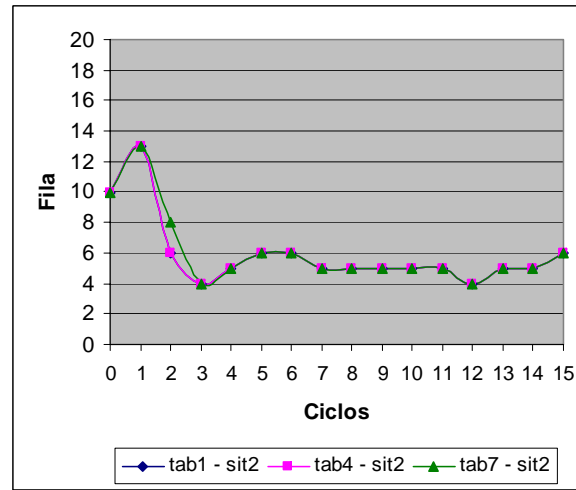


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

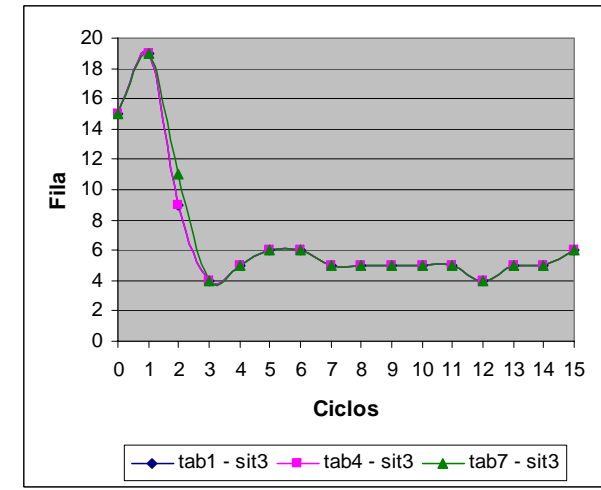
**Figura D.7** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Baixo, Fluxo Variável



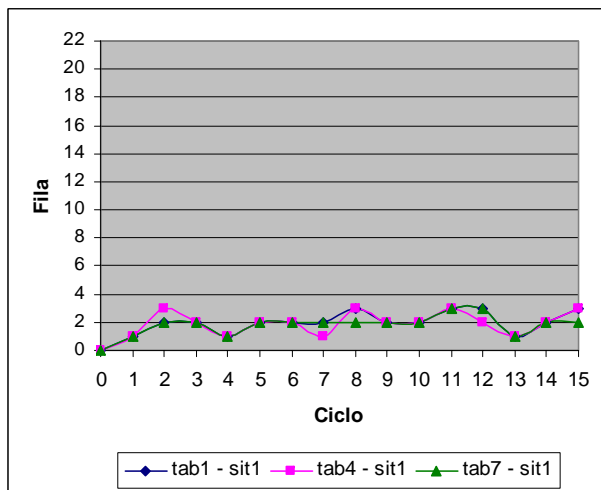
(a) Aproximação Principal, Sit 01



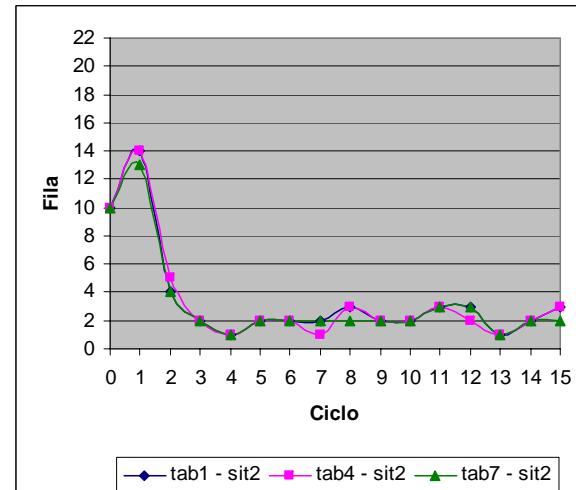
(b) Aproximação Principal, Sit 02



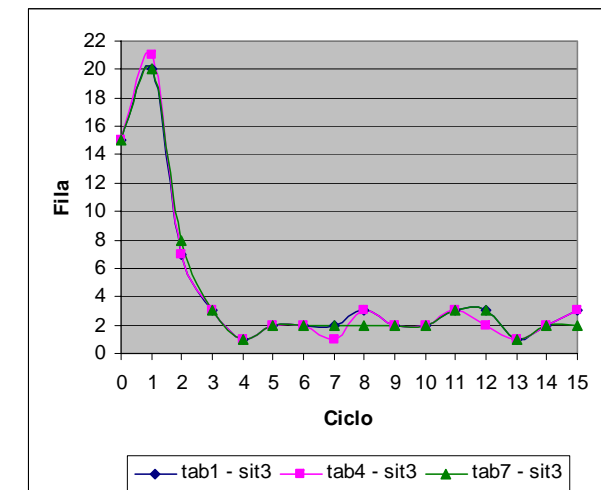
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

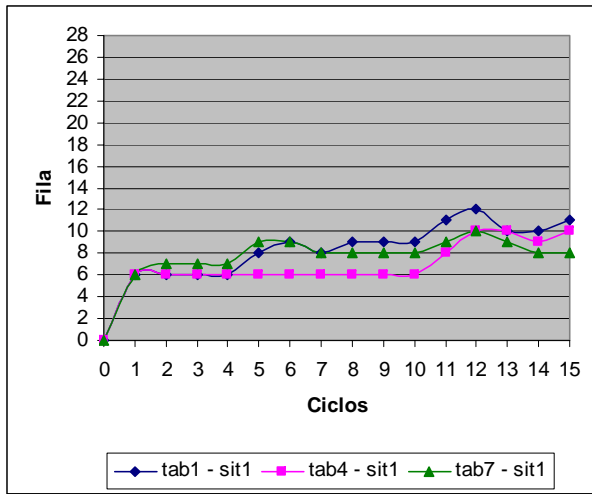


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

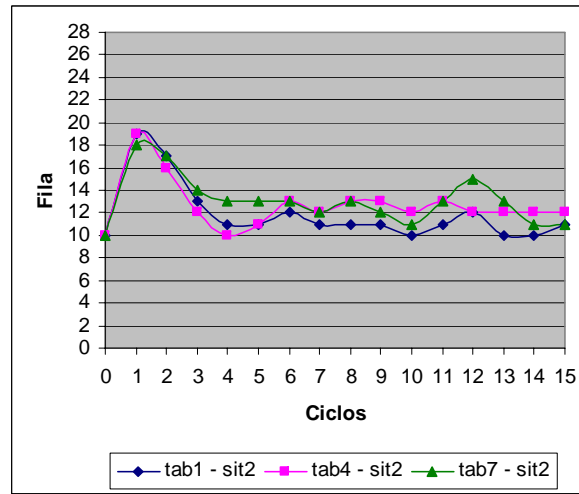


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

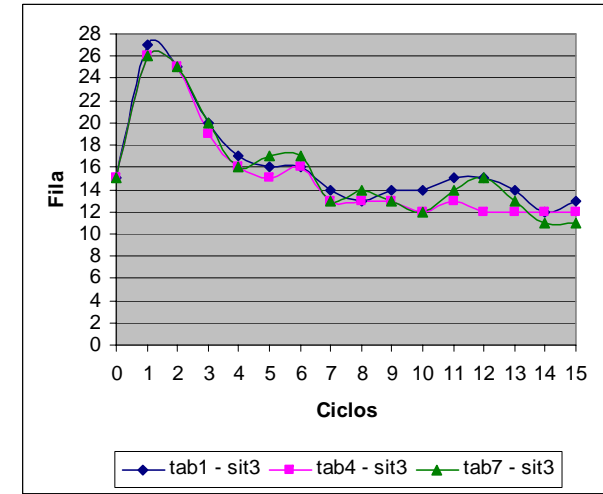
**Figura D.8** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Médio, Fluxo Variável



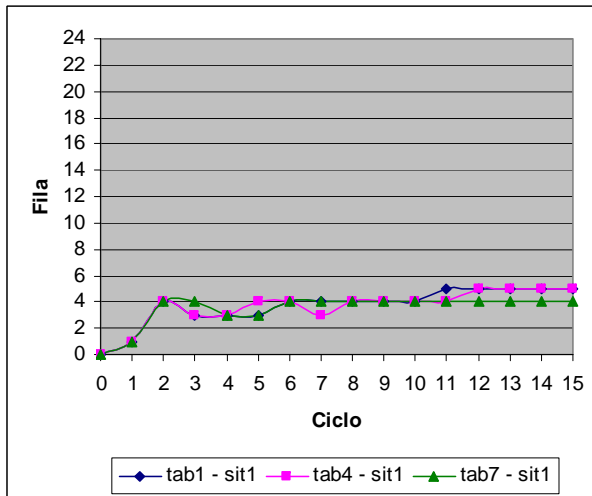
(a) Aproximação Principal, Sit 01



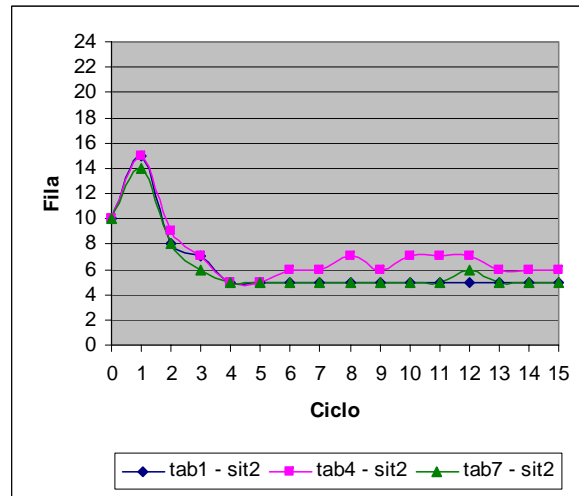
(b) Aproximação Principal, Sit 02



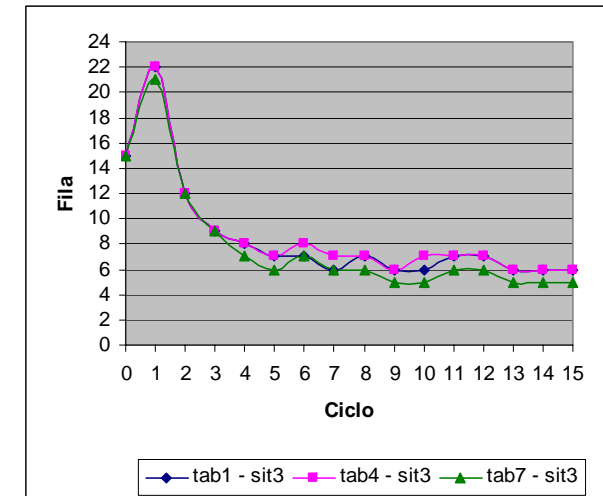
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

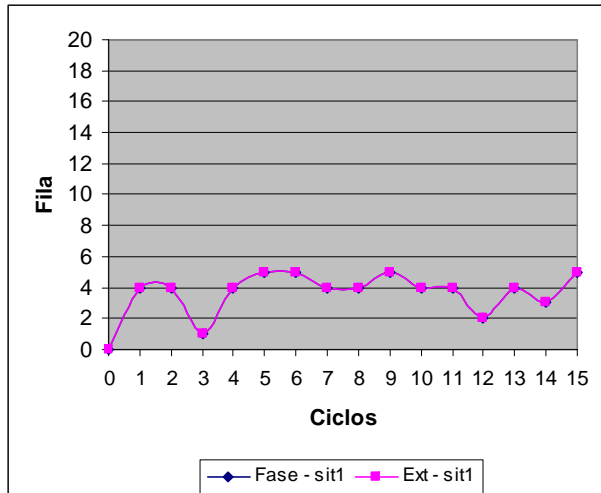


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

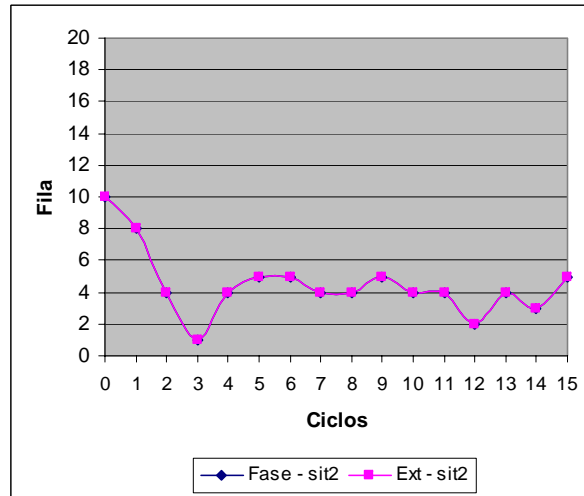


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

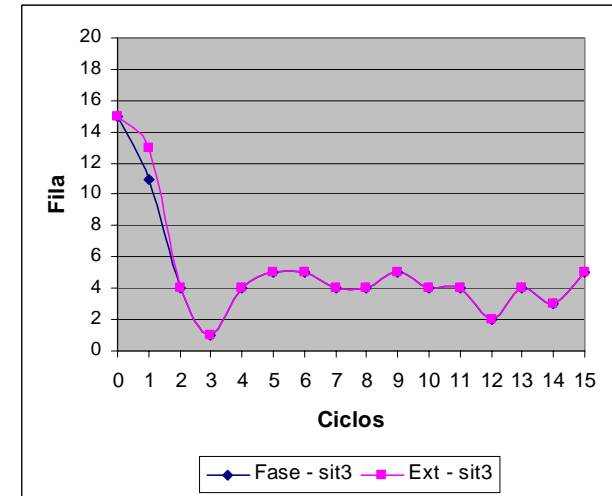
**Figura D.9** – Gráfico de Fila para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Alto, Fluxo Variável



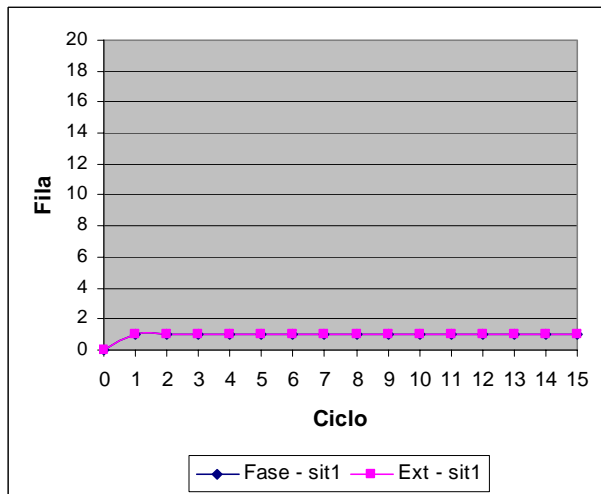
(a) Aproximação Principal, Sit 01



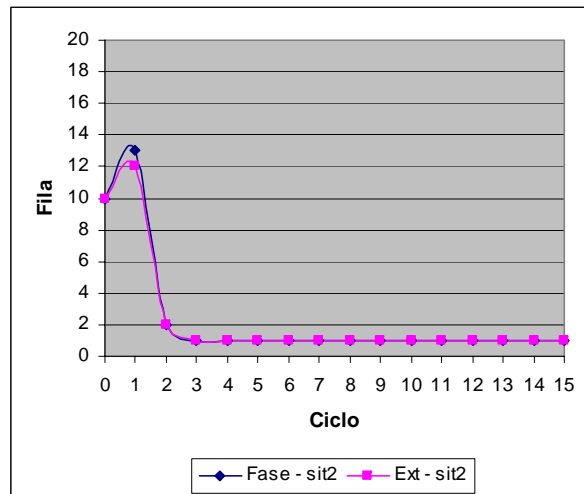
(b) Aproximação Principal, Sit 02



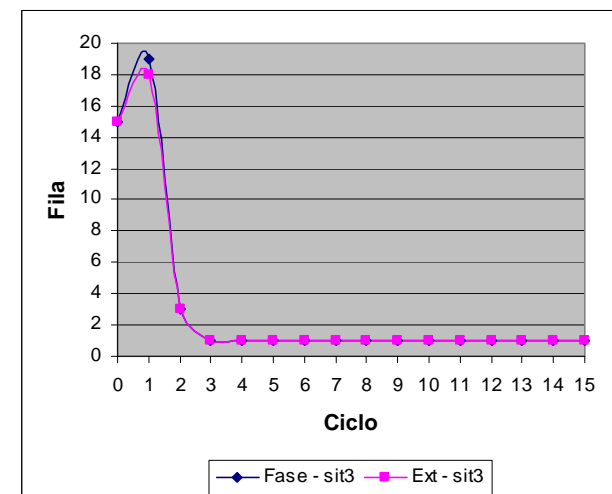
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01



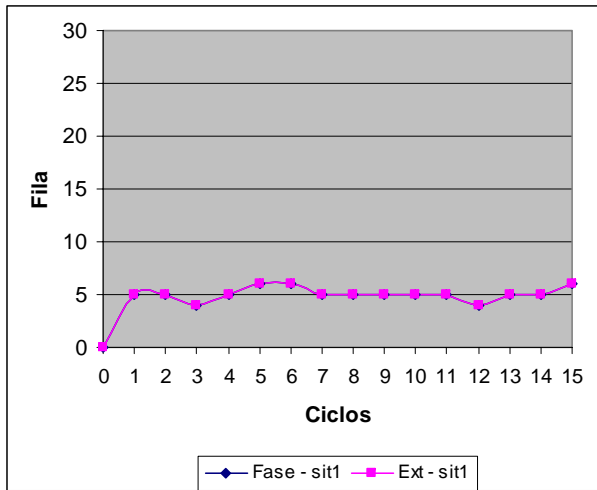
(e) Aproximação Secundária, Sit 02



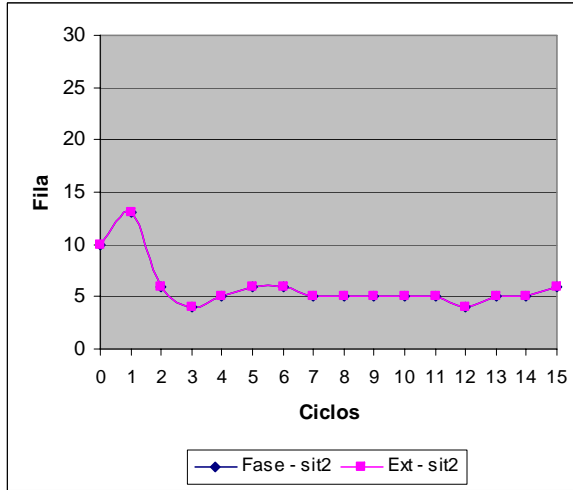
(f) Aproximação Secundária, Sit 03

**Figura D.10** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo, Fluxo Variável

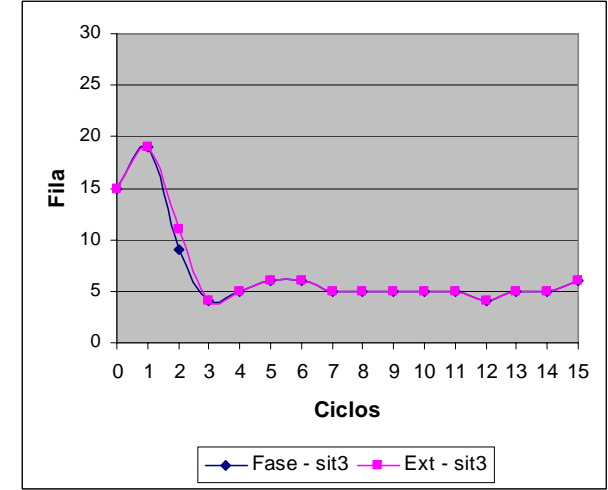




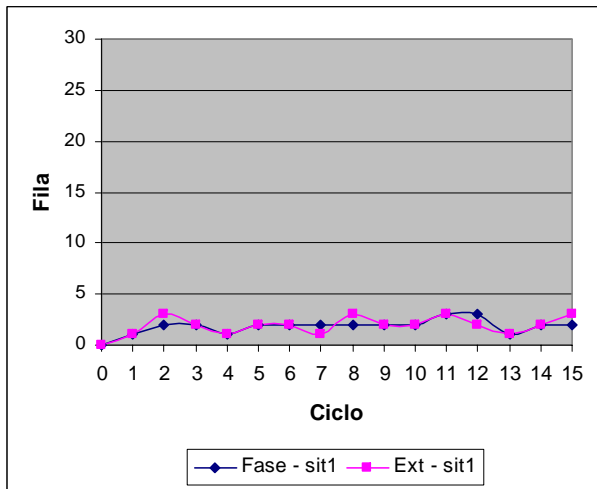
(a) Aproximação Principal, Sit 01



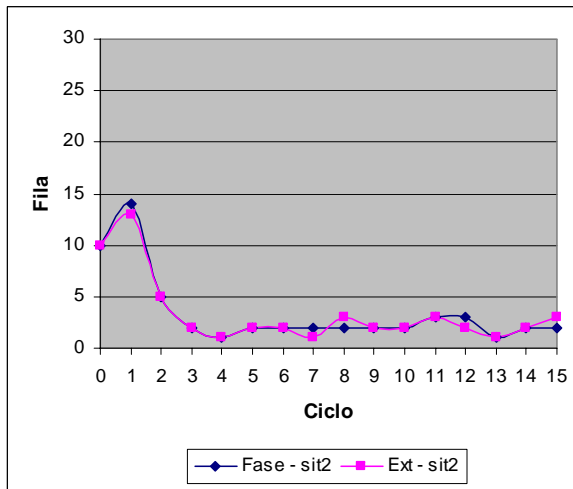
(b) Aproximação Principal, Sit 02



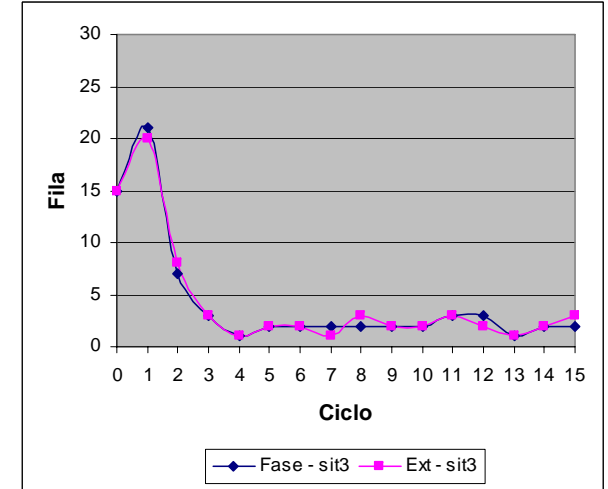
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

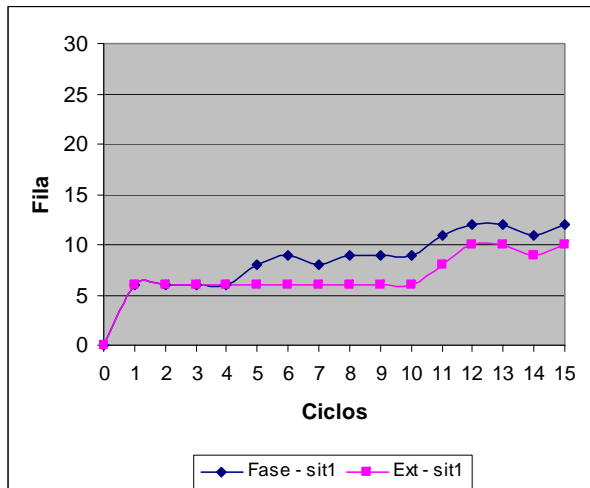


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

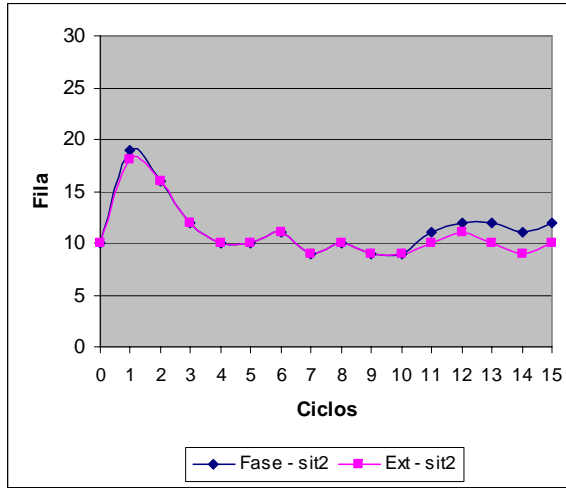


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

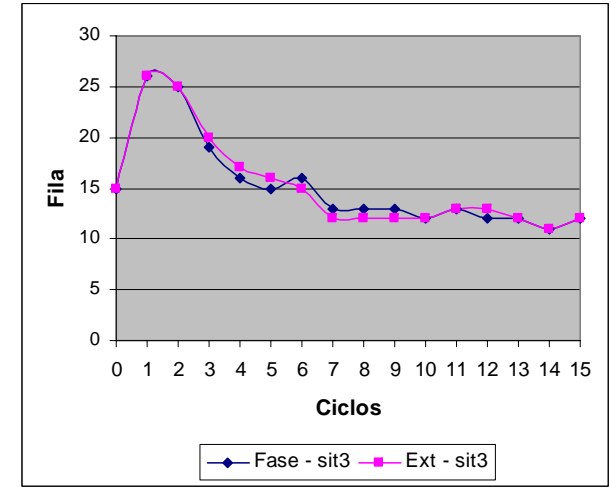
**Figura D.11** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio, Fluxo Variável



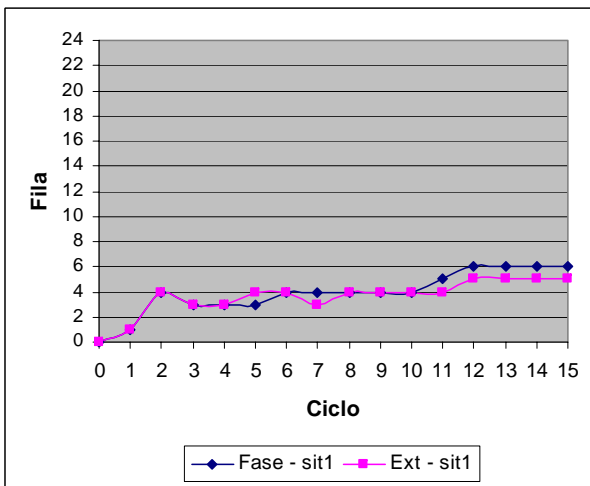
(a) Aproximação Principal, Sit 01



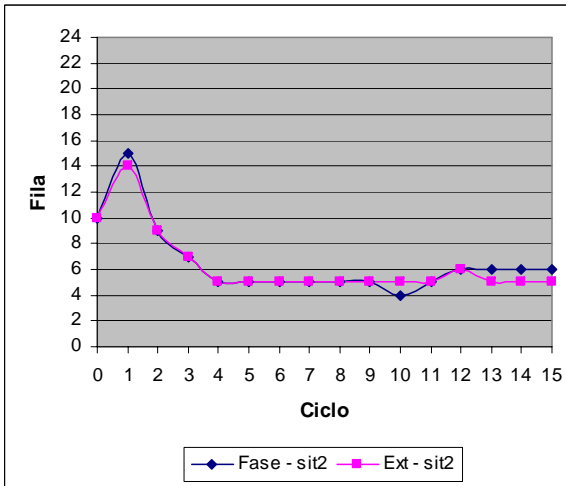
(b) Aproximação Principal, Sit 02



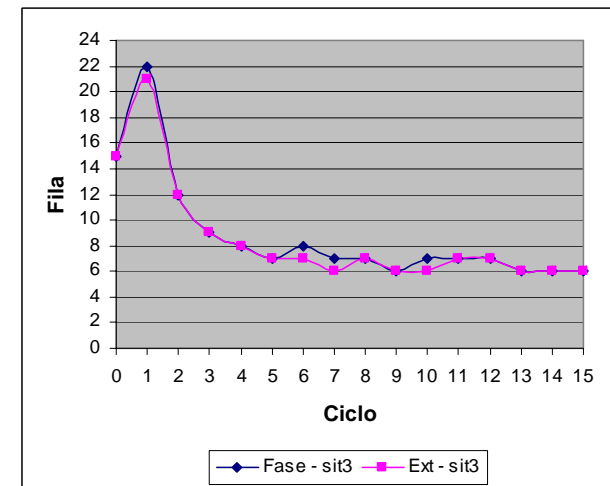
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

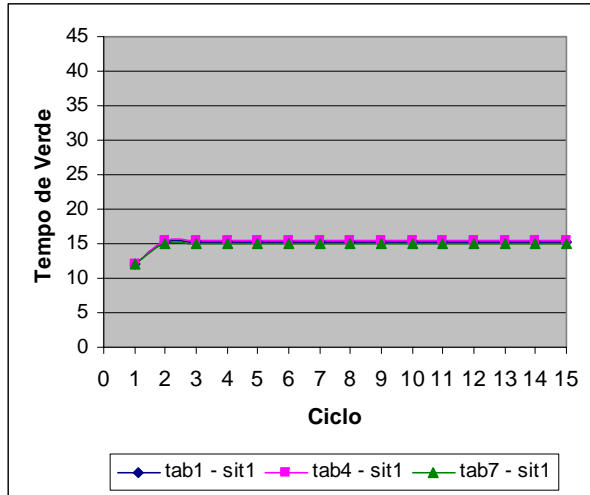


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

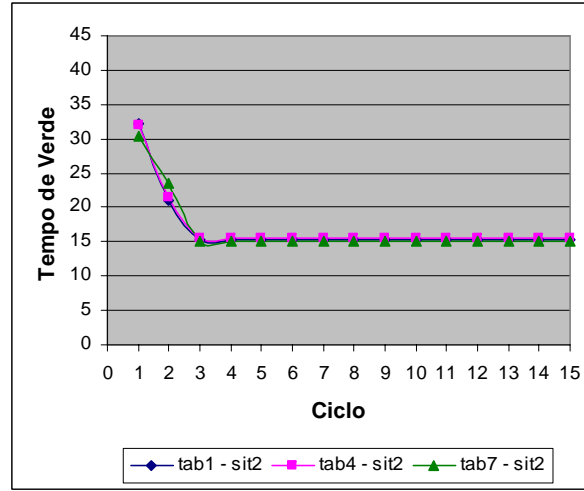


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

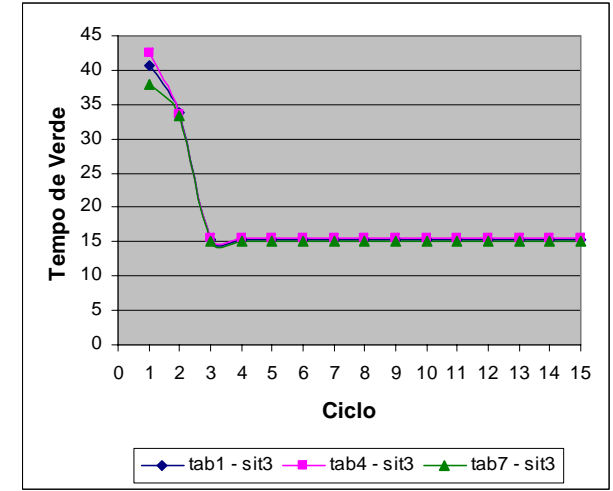
**Figura D.12** – Gráfico de Fila para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto, Fluxo Variável



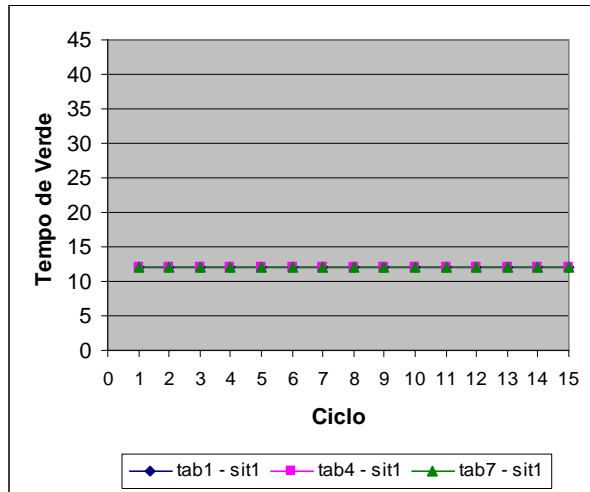
(a) Aproximação Principal, Sit 01



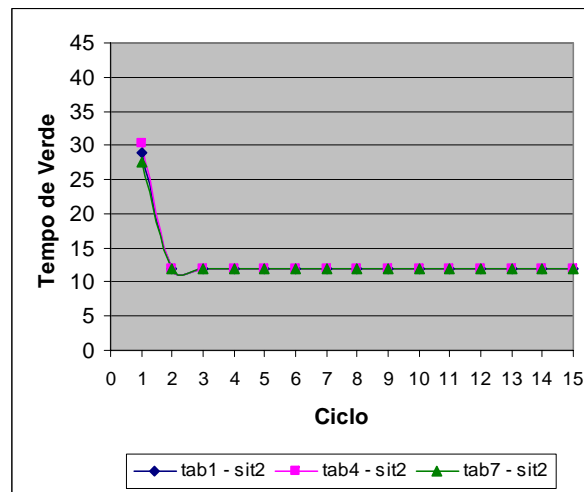
(b) Aproximação Principal, Sit 02



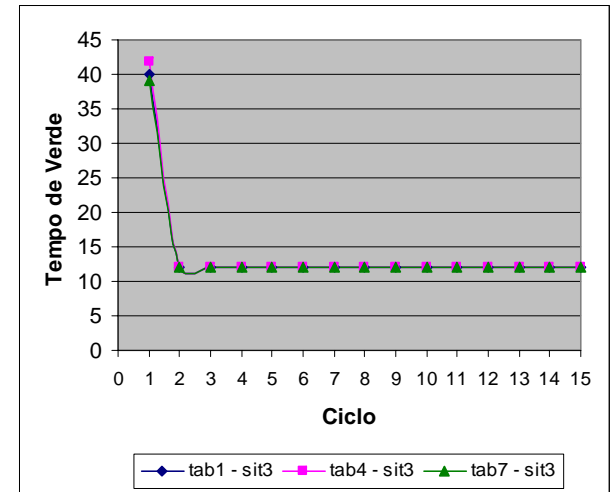
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

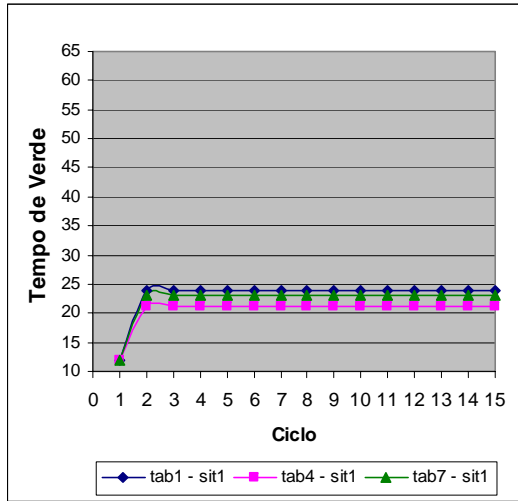


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

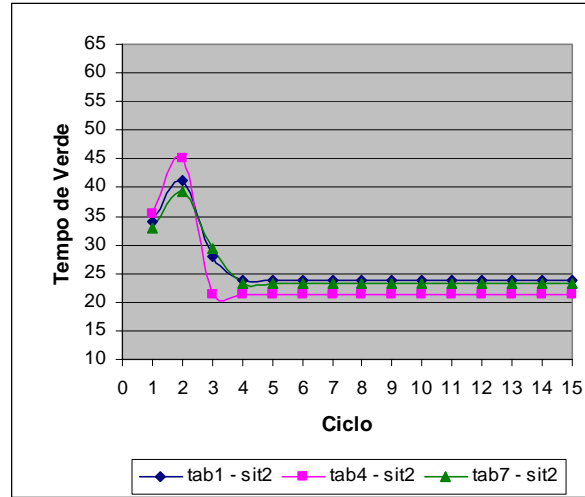


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

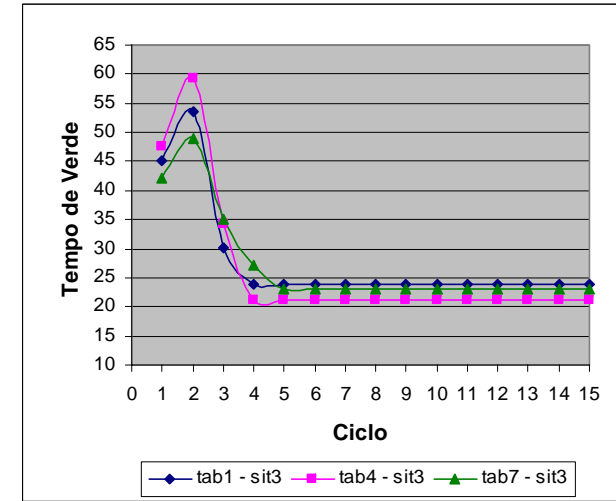
**Figura D.13** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Baixo, Fluxo Fixo



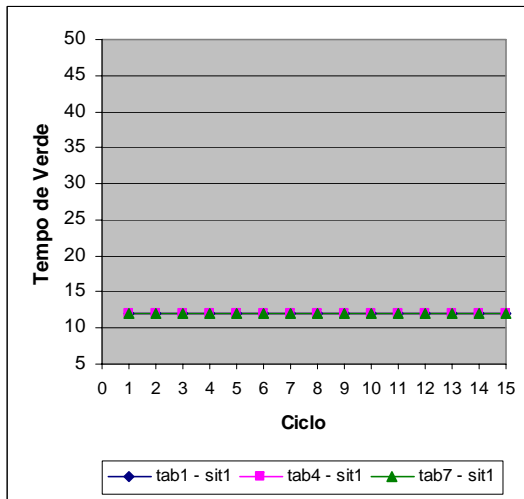
(a) Aproximação Principal, Sit 01



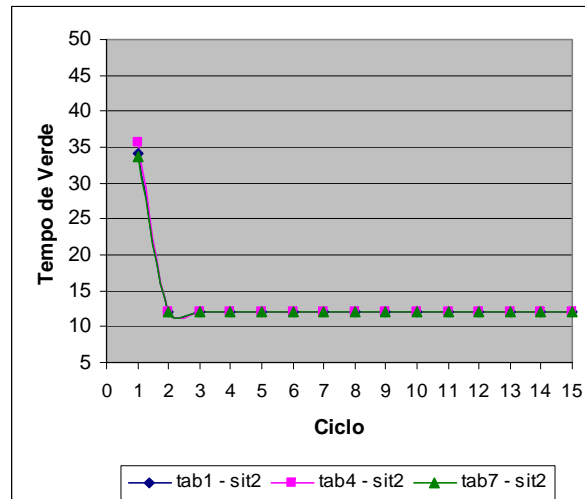
(b) Aproximação Principal, Sit 02



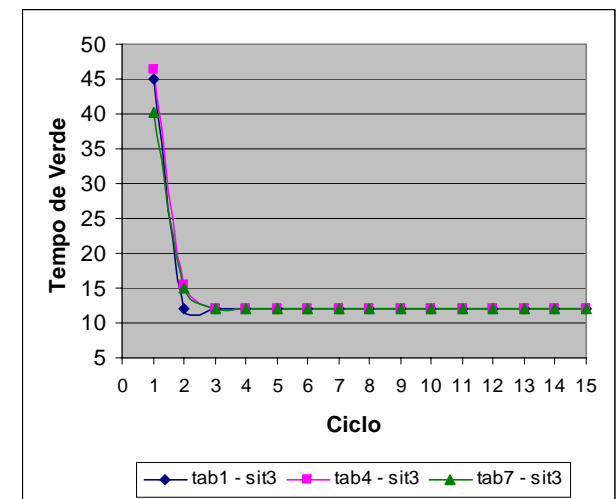
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

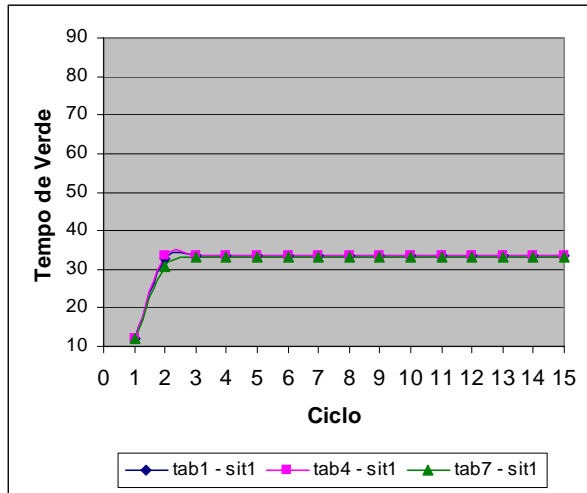


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

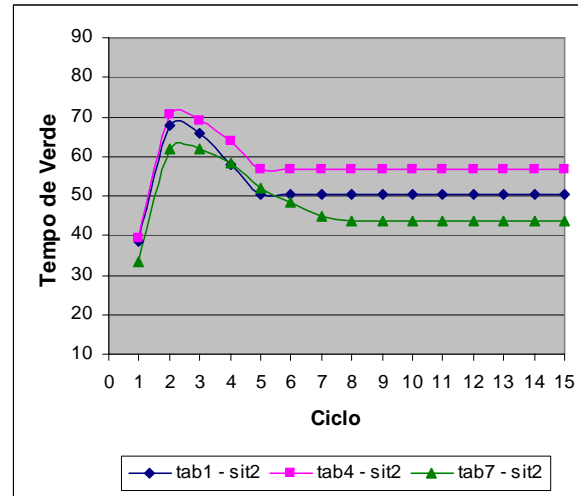


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

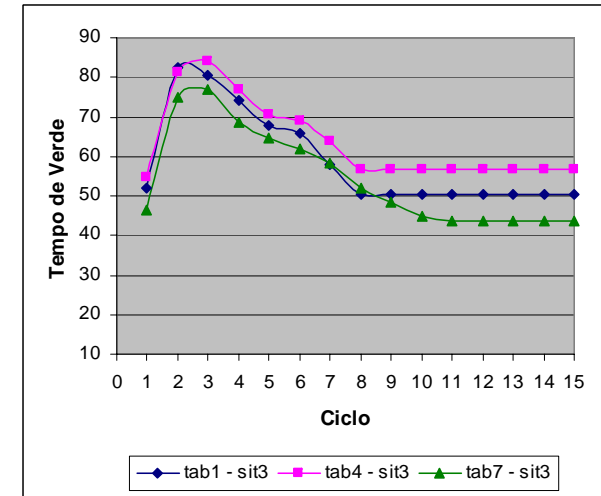
**Figura D.14** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Médio, Fluxo Fixo



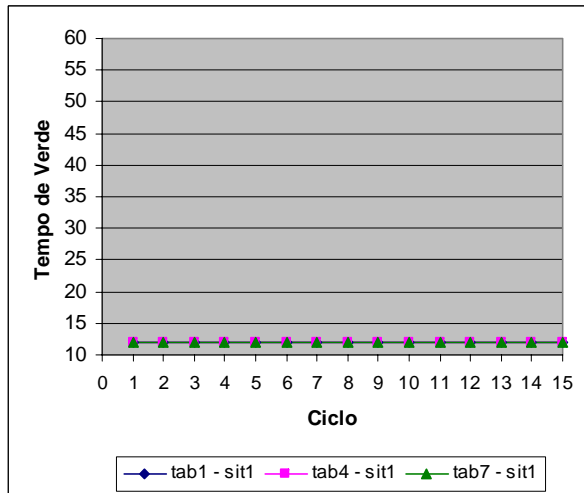
(a) Aproximação Principal, Sit 01



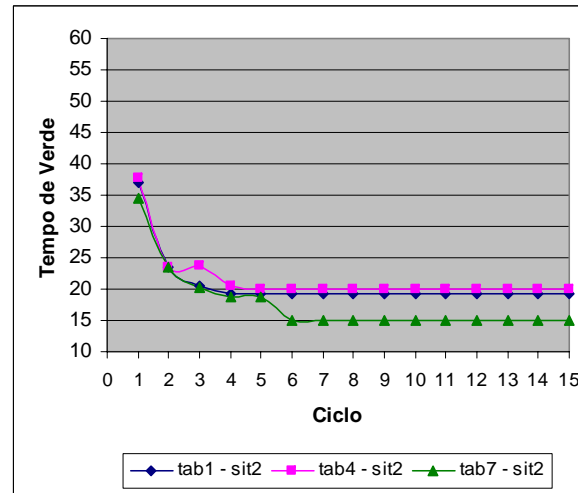
(b) Aproximação Principal, Sit 02



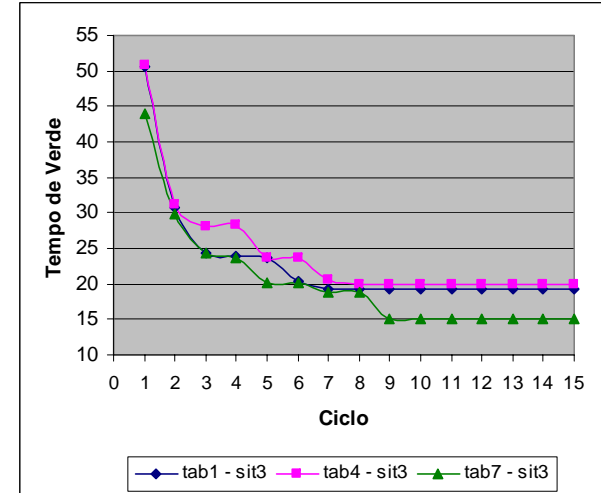
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

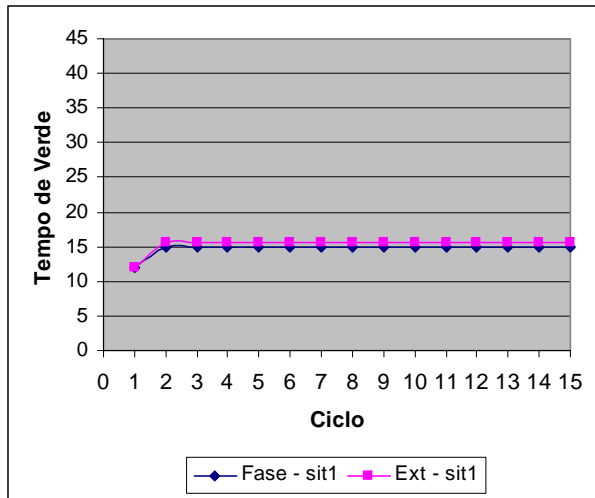


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

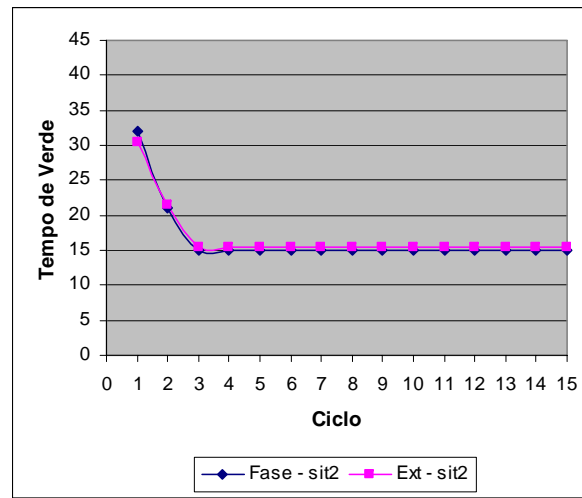


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

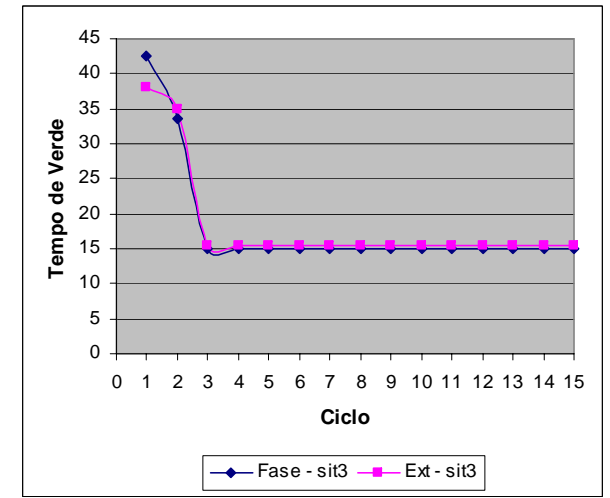
**Figura D.15** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Alto, Fluxo Fixo



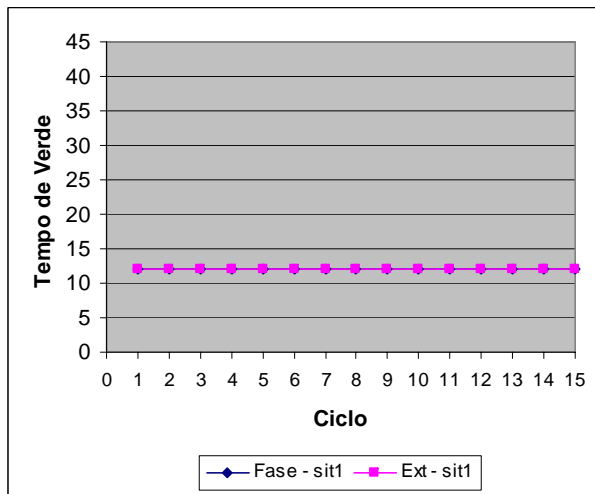
(a) Aproximação Principal, Sit 01



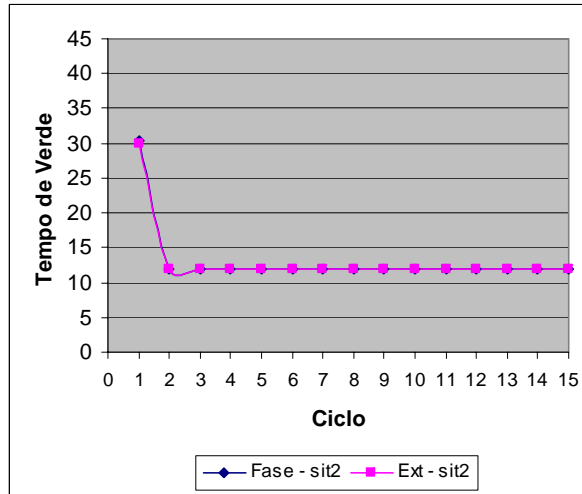
(b) Aproximação Principal, Sit 02



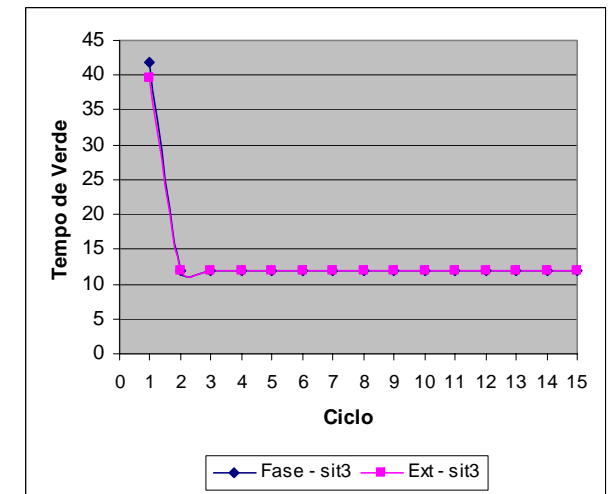
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

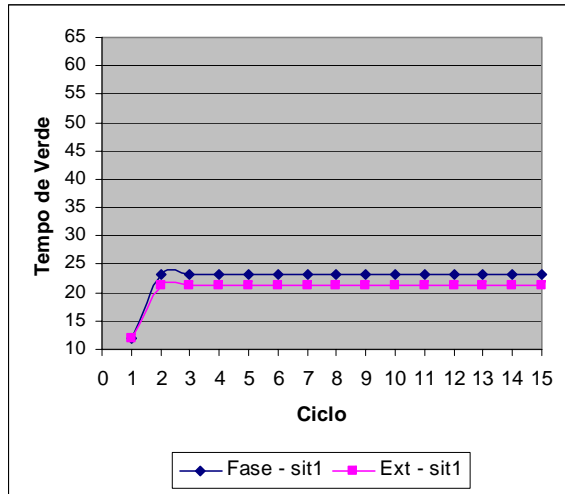


(e) Aproximação Secundária, Sit 02



(f) Aproximação Secundária, Sit 03

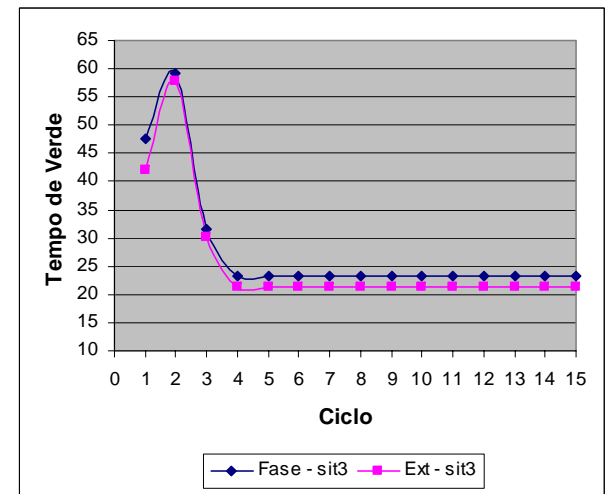
**Figura D.16** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo, Fluxo Fixo



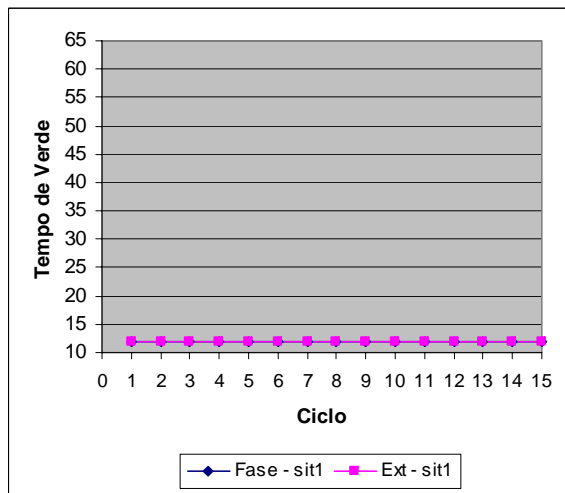
(a) Aproximação Principal, Sit 01



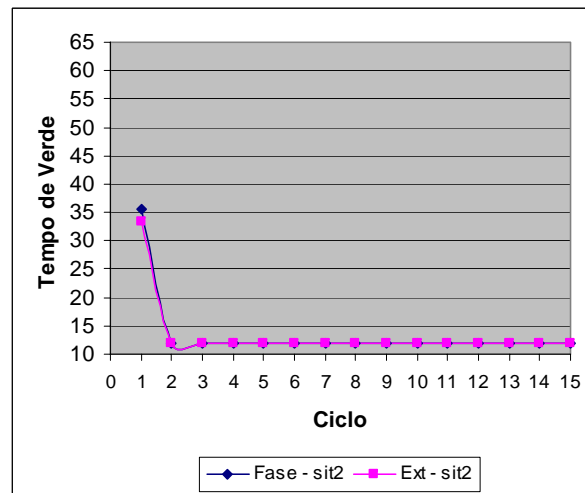
(b) Aproximação Principal, Sit 02



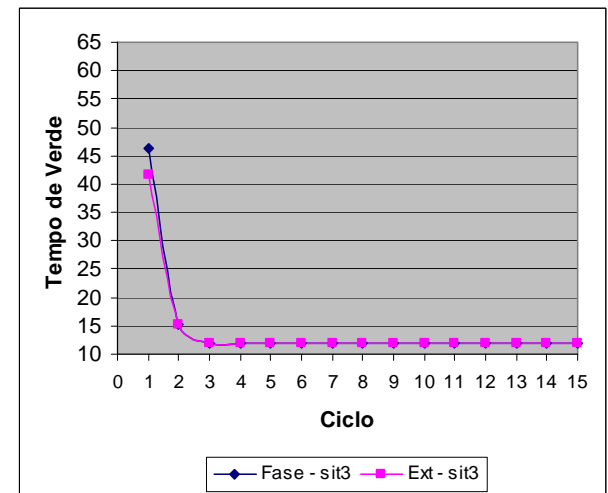
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

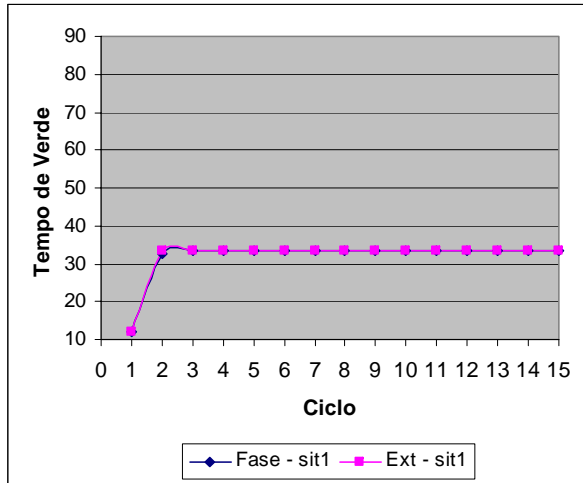


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

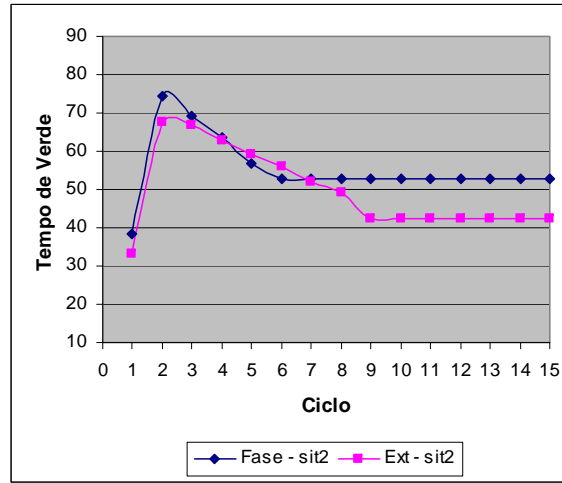


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

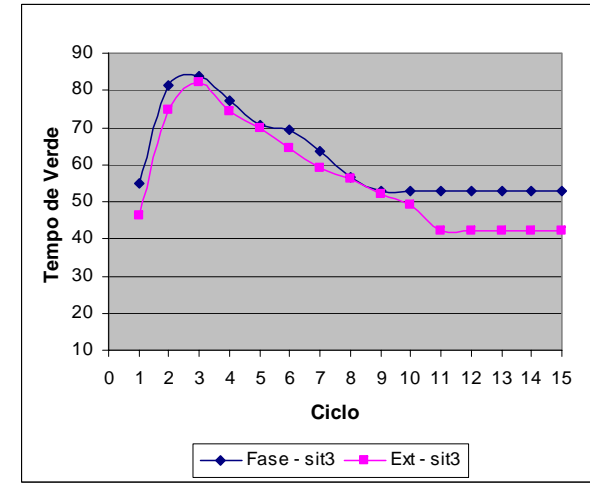
**Figura D.17** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio, Fluxo Fixo



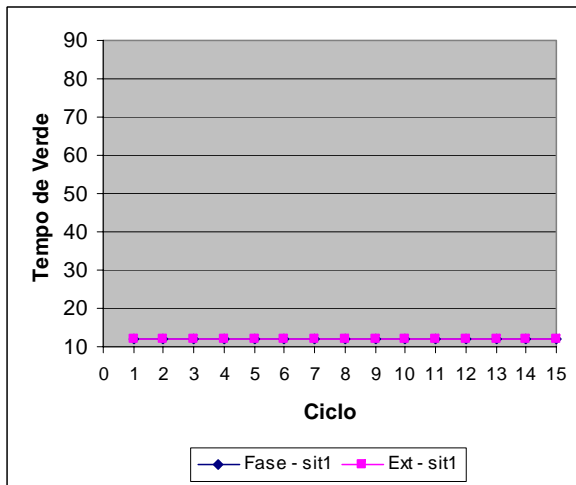
(a) Aproximação Principal, Sit 01



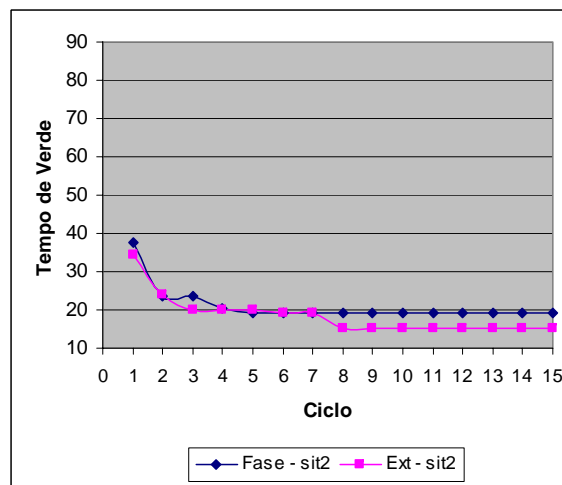
(b) Aproximação Principal, Sit 02



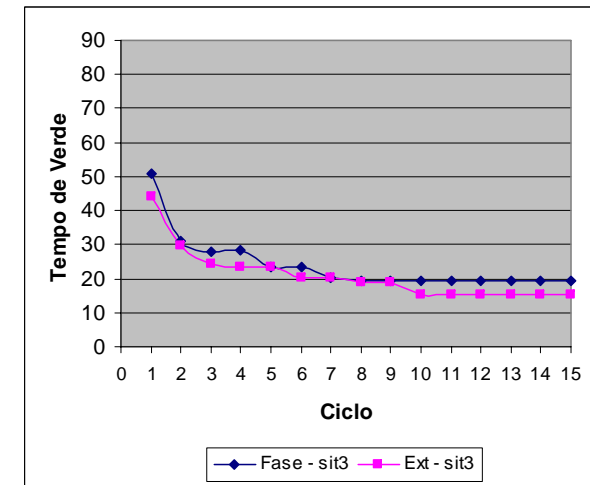
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01



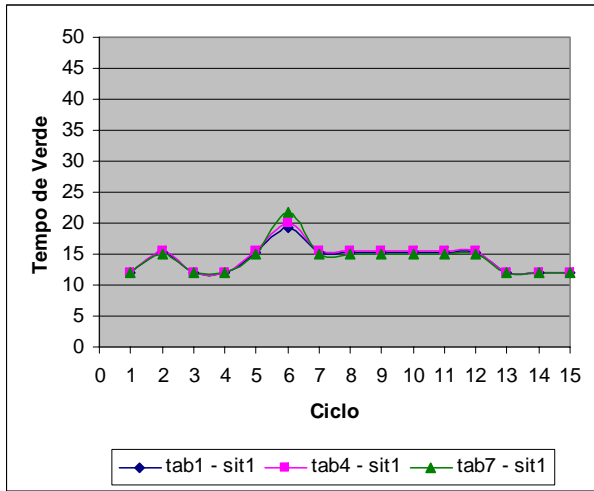
(e) Aproximação Secundária, Sit 02



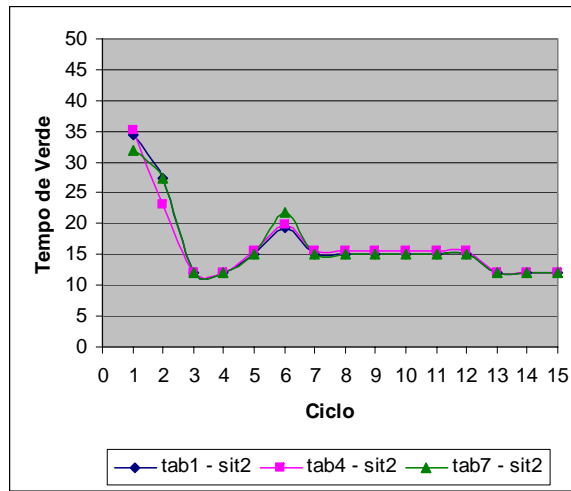
(f) Aproximação Secundária, Sit 03

**Figura D.18** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto, Fluxo Fixo

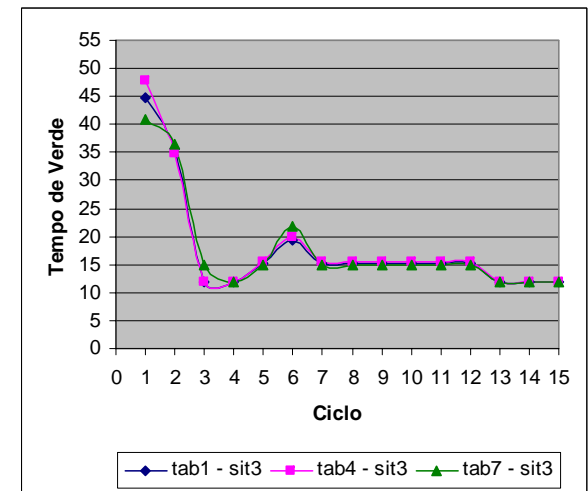




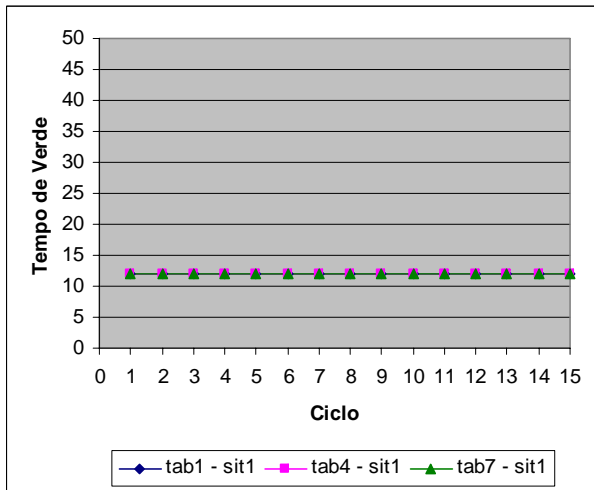
(a) Aproximação Principal, Sit 01



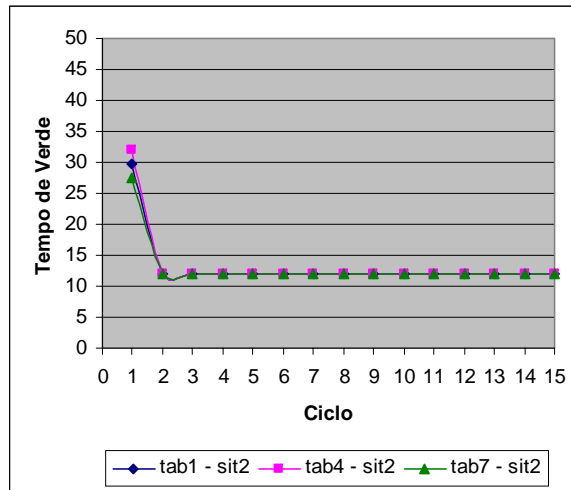
(b) Aproximação Principal, Sit 02



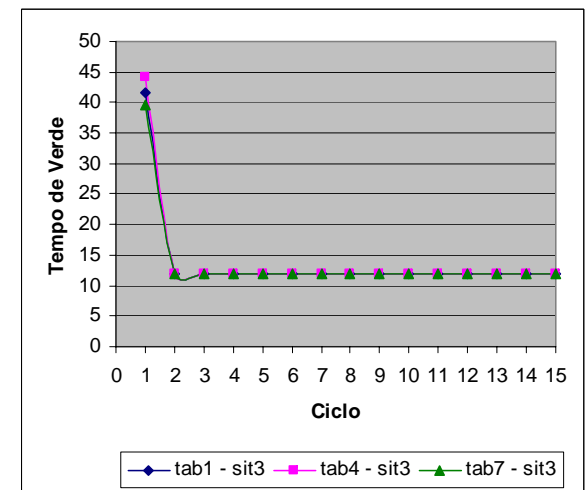
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

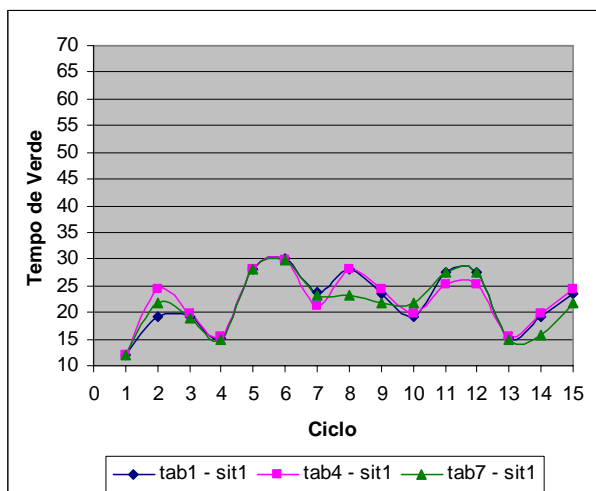


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

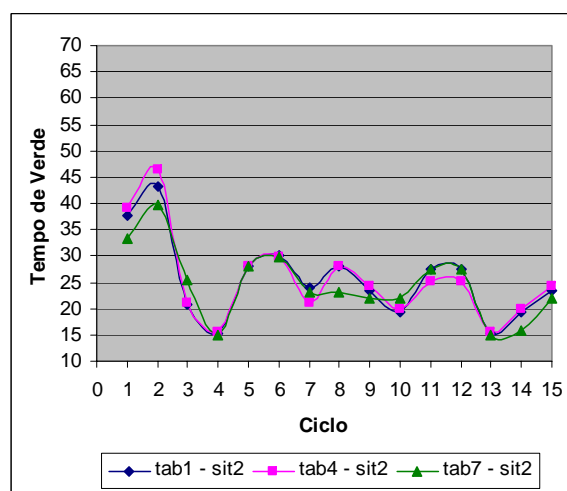


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

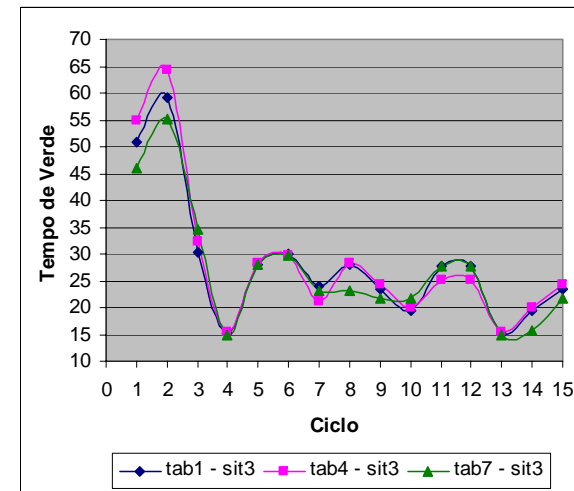
**Figura D.19** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Baixo, Fluxo Variável



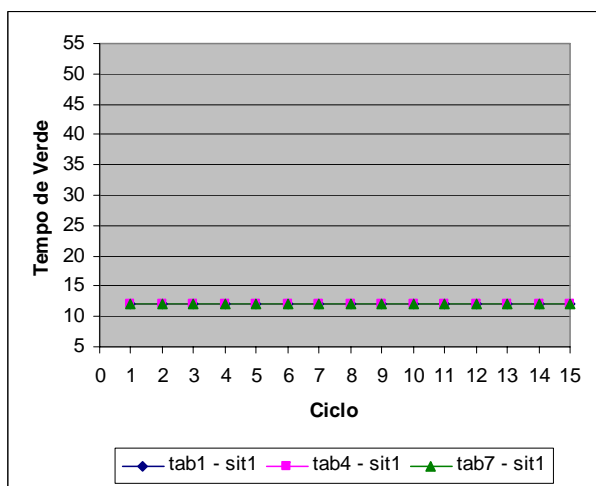
(a) Aproximação Principal, Sit 01



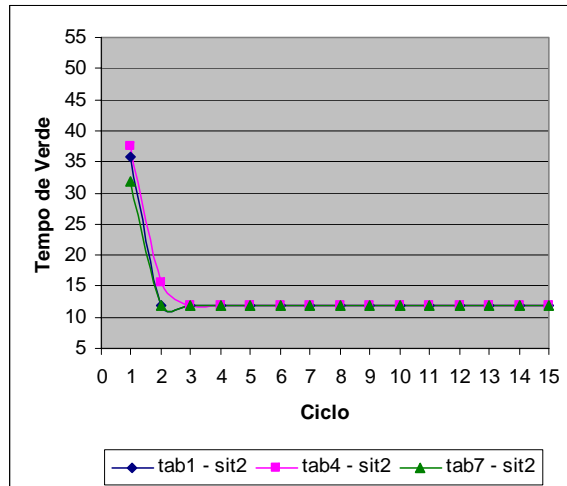
(b) Aproximação Principal, Sit 02



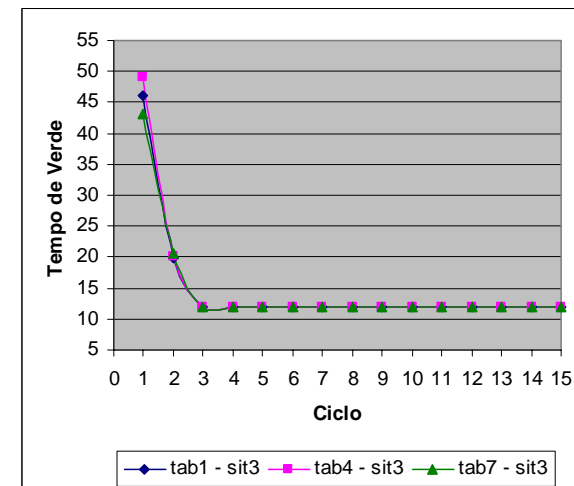
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

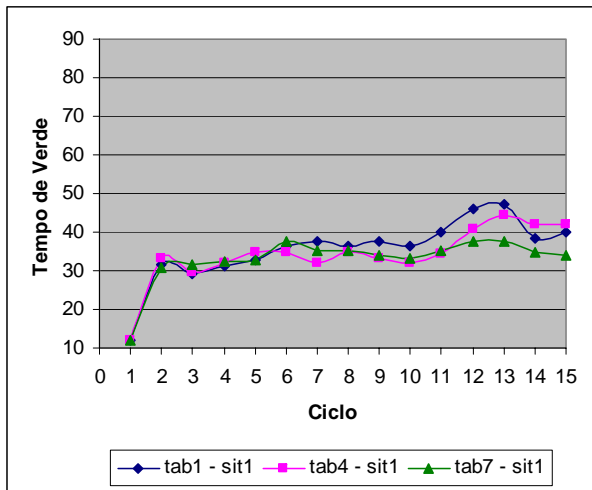


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

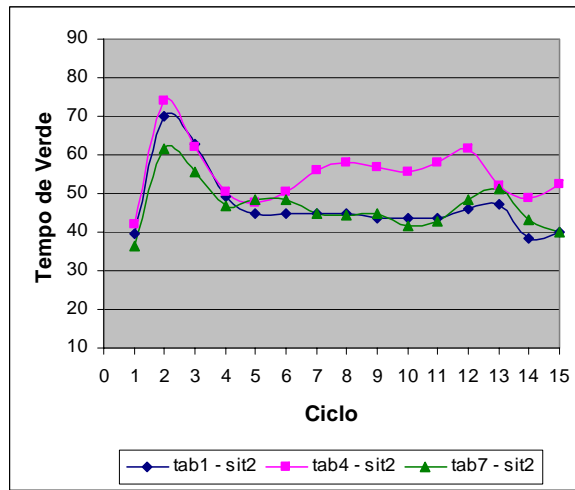


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

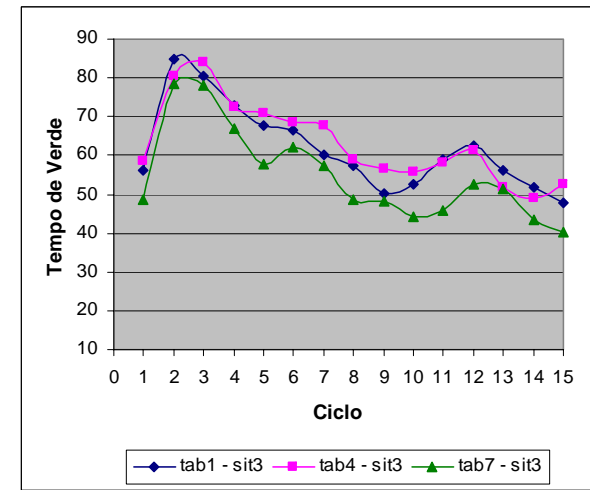
**Figura D.20** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Médio, Fluxo Variável



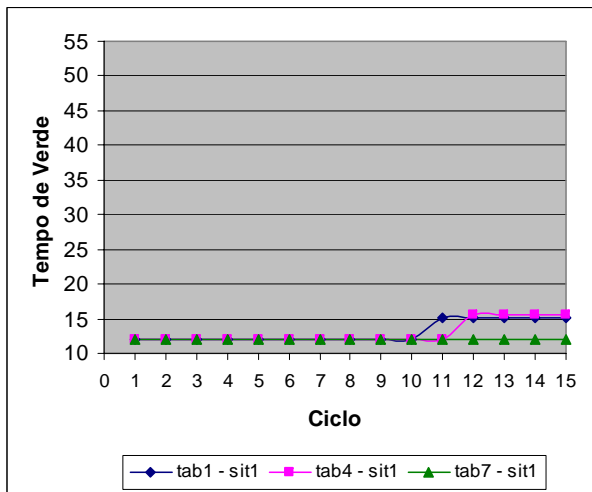
(a) Aproximação Principal, Sit 01



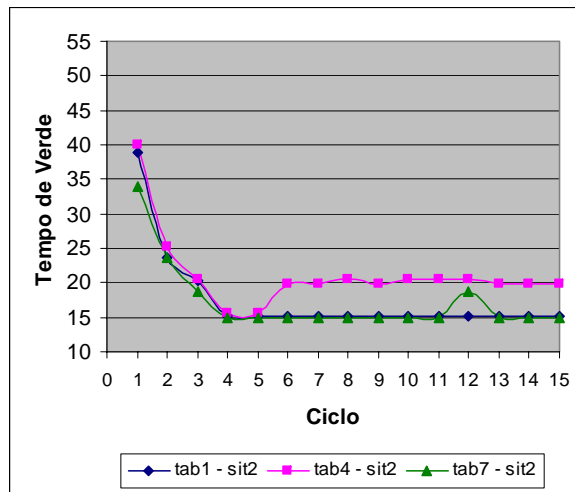
(b) Aproximação Principal, Sit 02



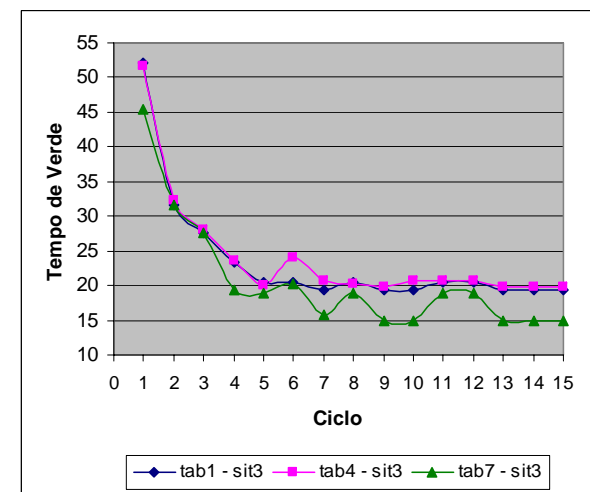
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

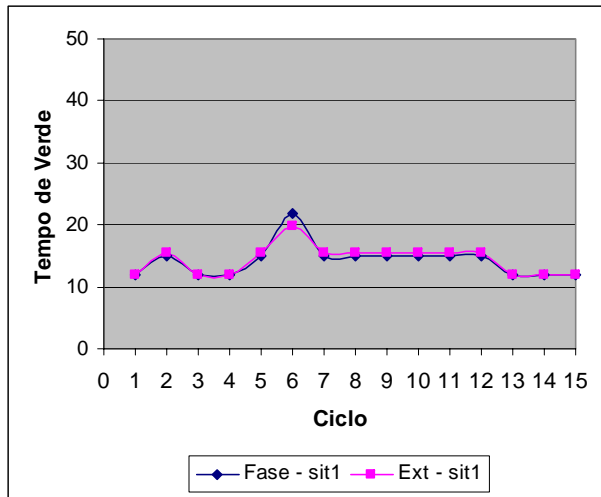


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

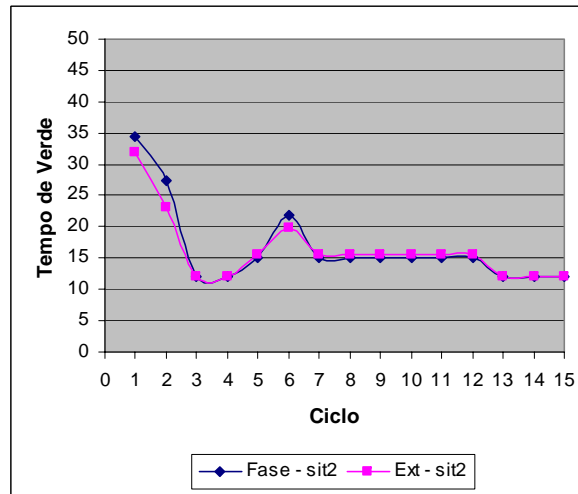


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

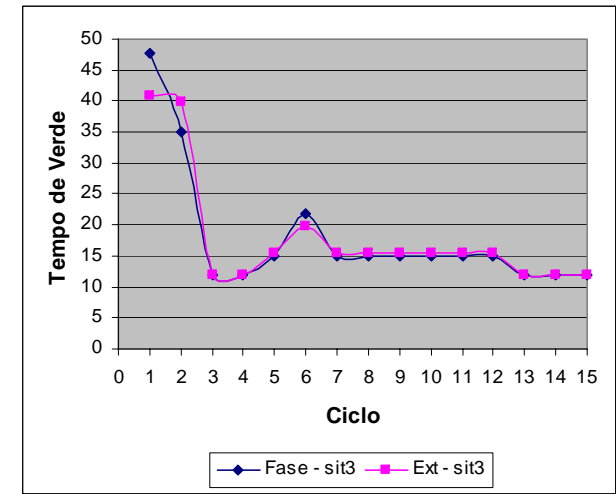
**Figura D.21** – Tempo de Verde para Controle Semafórico *Fuzzy* Convencional, Volume Alto, Fluxo Variável



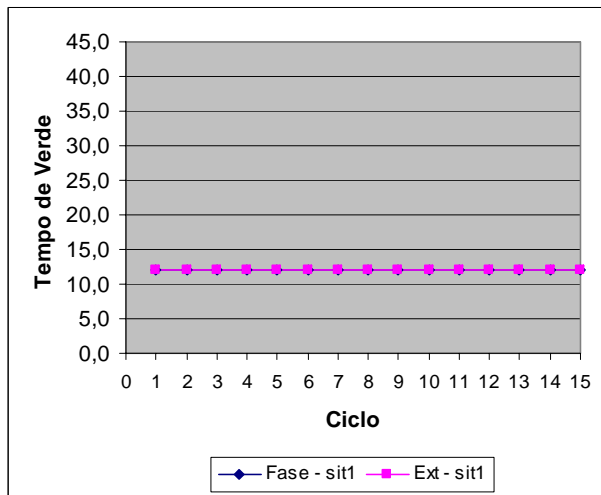
(a) Aproximação Principal, Sit 01



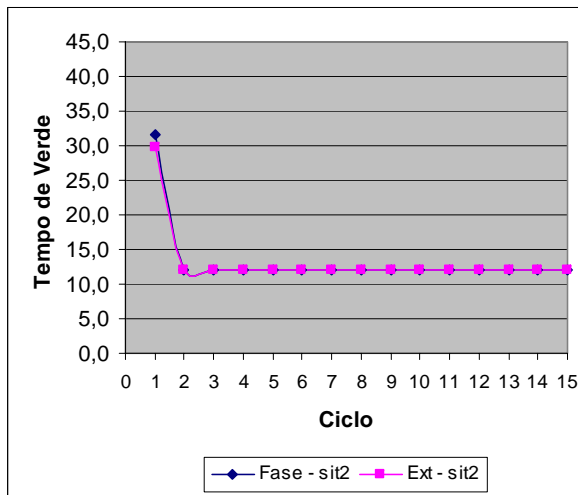
(b) Aproximação Principal, Sit 02



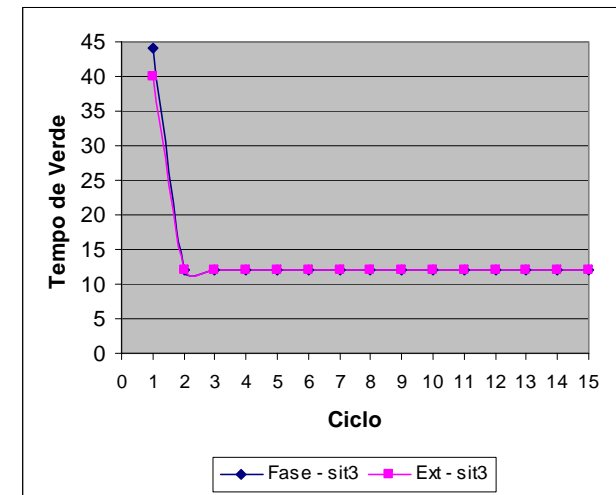
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

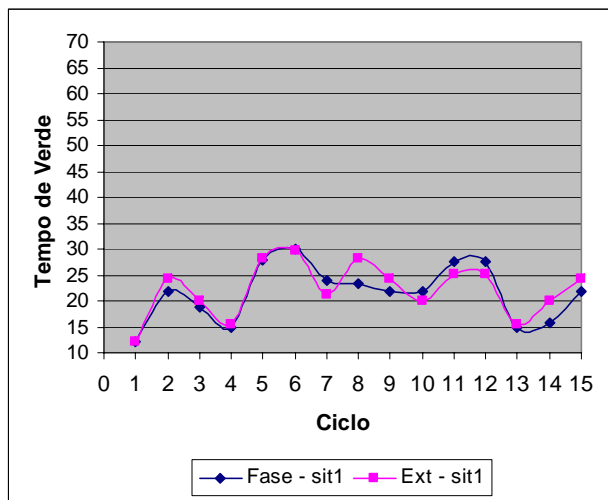


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

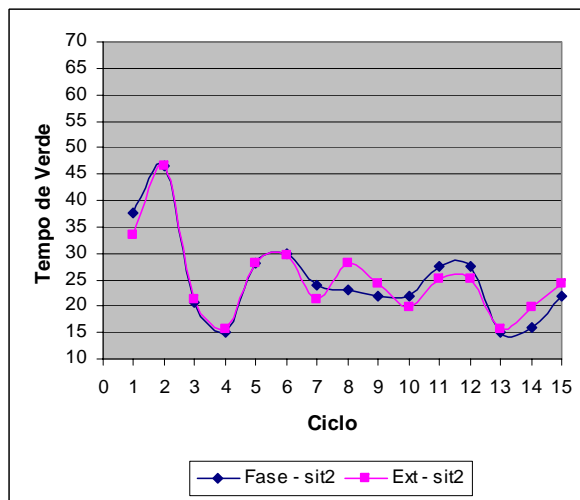


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

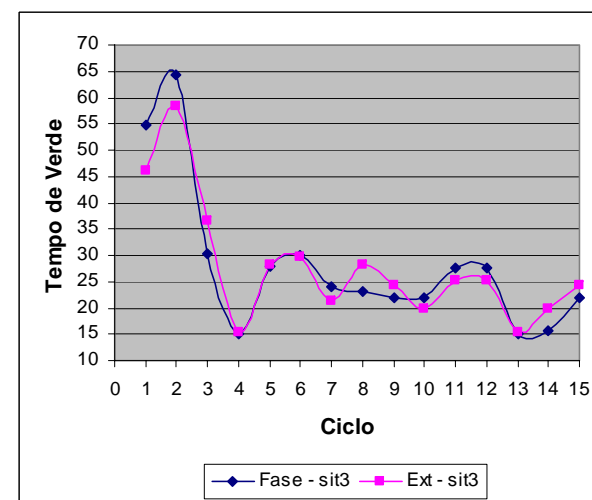
**Figura D.22** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Baixo, Fluxo Variável



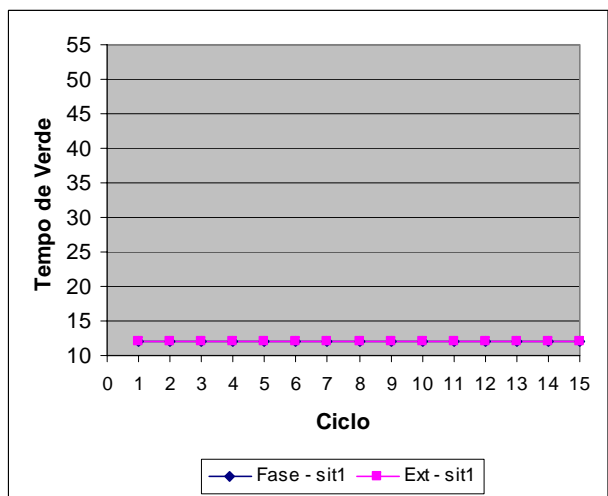
(a) Aproximação Principal, Sit 01



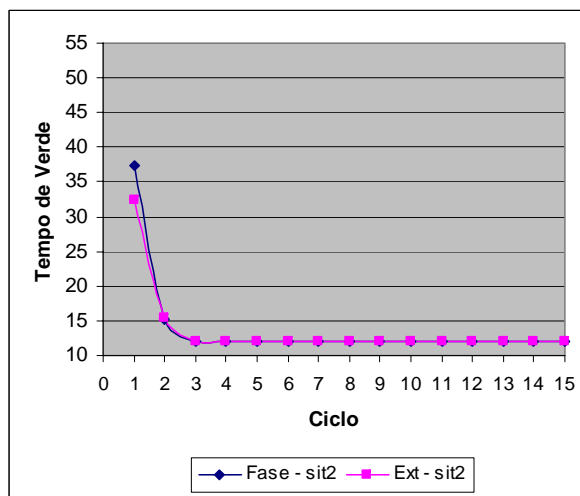
(b) Aproximação Principal, Sit 02



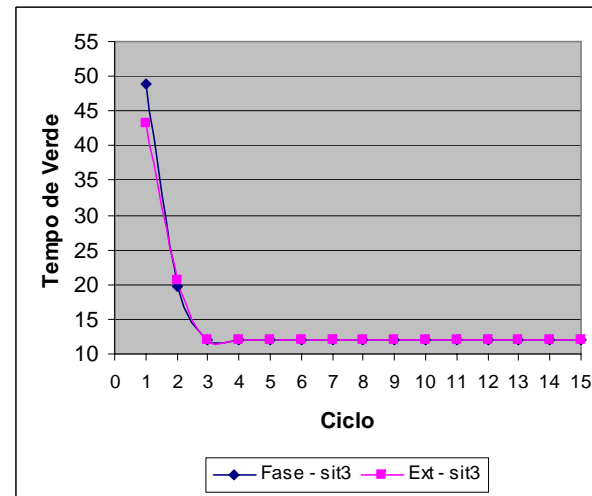
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01

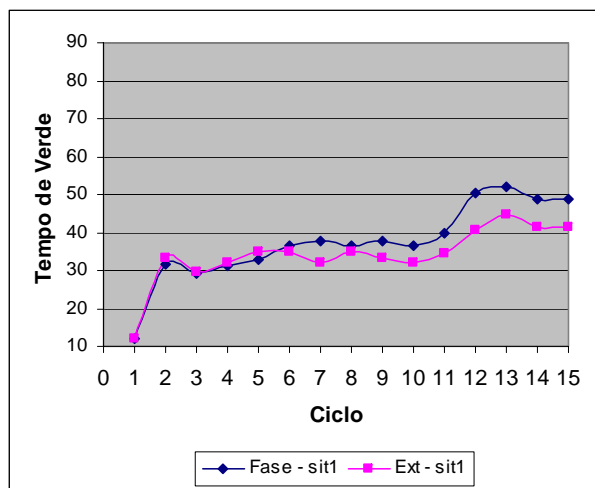


(e) Aproximação Secundária, Sit 02

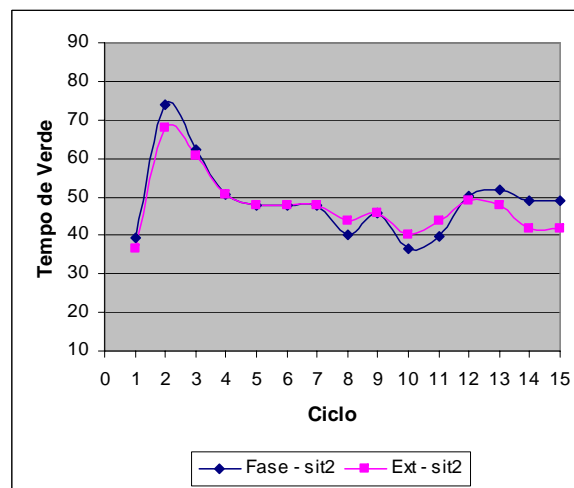


(f) Aproximação Secundária, Sit 03

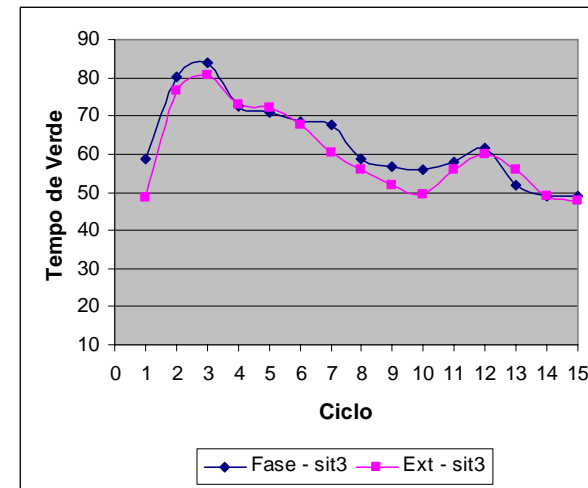
**Figura D.23** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Médio, Fluxo Variável



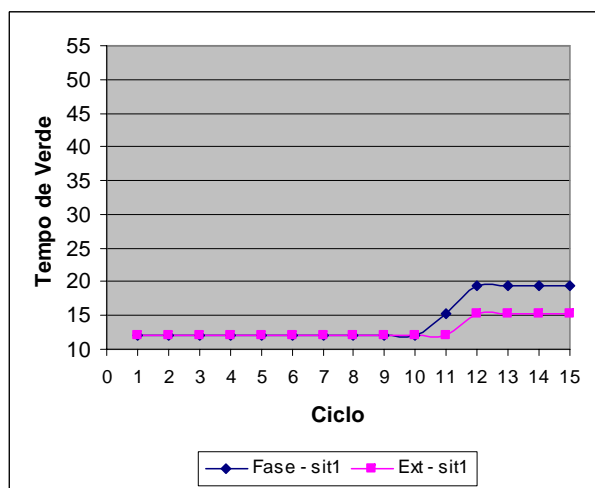
(a) Aproximação Principal, Sit 01



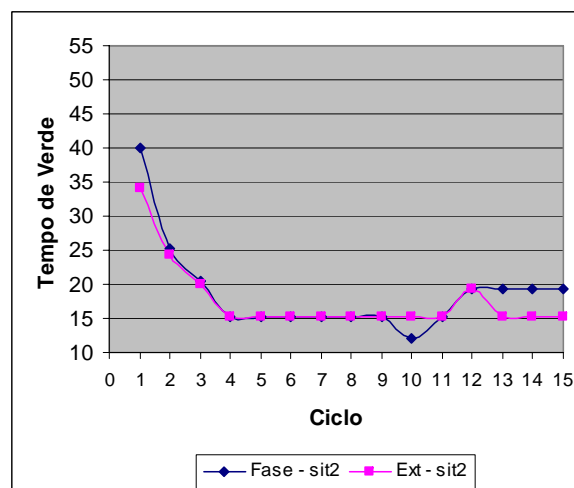
(b) Aproximação Principal, Sit 02



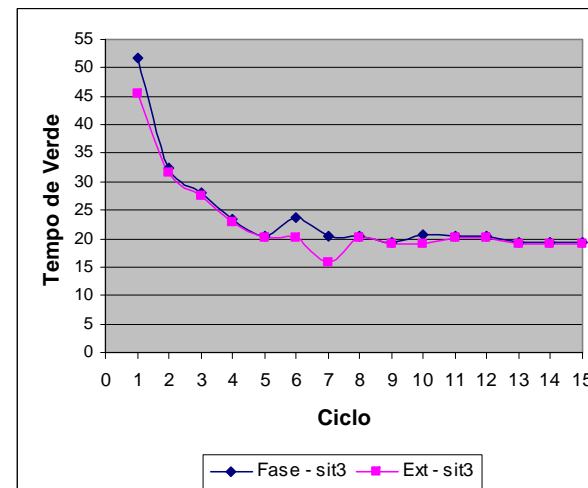
(c) Aproximação Principal, Sit 03



(d) Aproximação Secundária, Sit 01



(e) Aproximação Secundária, Sit 02



(f) Aproximação Secundária, Sit 03

**Figura D.24** – Tempo de Verde para Seleção Dinâmica de Planos *Fuzzy*, Volume Alto, Fluxo Variável