

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

**ESTUDOS DE ELEMENTOS DE CONTROLADORES
SEMAFÓRICOS *FUZZY* COM APLICAÇÃO PARA
OPERAÇÃO EM REDE ABERTA**

MICHELLE ANDRADE

ORIENTADOR: MARIA ALICE P. JACQUES

CO-ORIENTADOR: MARCELO LADEIRA

TESE DE DOUTORADO EM TRANSPORTES

BRASÍLIA / DF: OUTUBRO / 2009

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

**ESTUDOS DE ELEMENTOS DE CONTROLADORES
SEMAFÓRICOS *FUZZY* COM APLICAÇÃO PARA
OPERAÇÃO EM REDE ABERTA**

MICHELLE ANDRADE

**TESE DE DOUTORADO 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 DOUTOR EM OPERAÇÃO DE TRANSPORTES.**

APROVADA POR:



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



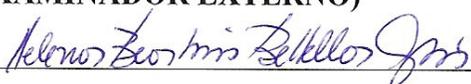
**PAULO CESAR MARQUES DA SILVA, PhD (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**PASTOR WILLY GONZALES TACO, Dr (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)**



**JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI, PhD (EESC-USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)**



**HELENA BEATRIZ BETTELLA CYBIS, PhD (UFRGS)
(EXAMINADOR EXTERNO)**

Data: Brasília/DF, 23 de Outubro de 2009.

FICHA CATALOGRÁFICA

ANDRADE, MICHELLE

Estudos de elementos de controladores semafóricos *fuzzy* com aplicação para operação em rede aberta. Brasília, 2009.
xix, 238p., 210x297mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Transporte, 2009).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1 – Controle de Tráfego

2 – Controle Semafórico em Rede

3 – Controladores *Fuzzy*

4 – Sistemas Inteligentes

I – ENC/FT/UnB

II – Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ANDRADE, M. (2009). Estudos de elementos de controladores semafóricos *fuzzy* com aplicação para operação em rede aberta. Tese de doutorado, Publicação T.TD-002 A/2009, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, DF, 236p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Michelle Andrade

TÍTULO: Estudos de elementos de controladores semafóricos *fuzzy* com aplicação para operação em rede aberta.

GRAU: Doutor ANO: 2009.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito da autora.


Michelle Andrade

Quadra 201, Bloco B, Apto 202 – (61) 8452-6910
CEP: 71.937-540 – Brasília/DF – Brasil

AGRADECIMENTO

O desenvolvimento de uma pesquisa exige a concentração de conhecimento teórico, criação e análises, ou seja, um conjunto de atividades que o pesquisador realiza ora sozinho, ora em parcerias. Assim, as pessoas que participam de alguma forma das etapas de uma pesquisa são, portanto, co-autores da obra concluída.

Deixo, assim, meu agradecimento a todos que contribuíram para a construção deste trabalho, iniciando pela minha orientadora, Prof^a Maria Alice, ao meu co-orientador Prof. Marcelo Ladeira e à sua equipe de trabalho no Departamento de Ciência da Computação da UnB, especialmente ao Marcelo Assari, desenvolvedor do UnB-Sitracs sem o qual não seria possível realizar as avaliações das propostas apresentadas na tese. Agradeço ainda aos João Cucci (CET-SP) e Carlos Henrique (CTAFOR) pela disponibilidade de suporte nas etapas de estudos de campo, caso fossem realizadas. Ao Prof. Werner e sua equipe, especialmente ao Tiago e à Priscila, pelo apoio durante a estada na UFSC. Agradeço ao colega e Prof. Alan (EST-UnB) pelo suporte para realização dos testes estatísticos no SAS[®].

Agradeço aos componentes das bancas da qualificação, e finalmente da defesa da Tese – Prof. Pastor (PPGT-UnB), Prof. Paulo César (PPGT-UnB), Prof. Werner (UFSC), Prof. Setti (USP), Prof^a Helena (UFRGS) – pelas suas valiosas contribuições nas duas ocasiões.

Agradeço ainda, ao suporte financeiro proveniente da CAPES, à estrutura disponibilizada pelo PPGT-UnB e ao secretário Julio, pelo apoio na solução de todos os problemas administrativos deparados ao longo do caminho.

Por fim, agradeço a Deus e à minha família, que é meu suporte, origem e destino.

RESUMO

ESTUDOS DE ELEMENTOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY* COM APLICAÇÃO PARA OPERAÇÃO EM REDE ABERTA

O controle semafórico atuado pelo tráfego apresenta-se como uma alternativa promissora para o controle dos conflitos de tráfego em interseções, uma vez que tem o propósito de operar em resposta imediata à demanda nesses locais. Quando adequadamente empregada, essa forma de controle tende a reduzir os efeitos negativos conseqüentes do controle semafórico, tanto relacionados à operação do tráfego (atrasos, paradas), como também ao meio ambiente (consumo de combustíveis, emissão de poluentes, ruídos).

A utilização de técnicas de Inteligência Artificial na determinação dos tempos semafóricos para o controle atuado pelo tráfego tem apresentado resultados promissores e, por isso, vem despertando o interesse de pesquisadores por trabalhos neste tema. Em especial, os controladores semafóricos *fuzzy* que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, vêm sendo investigados no sentido de ampliar a compreensão da lógica *fuzzy* associada ao controle semafórico e assim, aprimorar o emprego desta ferramenta para esse tipo de aplicação.

Este trabalho de pesquisa apresenta um conjunto de investigações acerca dos controladores semafóricos *fuzzy* que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde. Os estudos passam por avaliações de elementos destes controladores – padrão de sobreposição dos conjuntos *fuzzy*, estrutura da base de regras e tipo de controlador *fuzzy* – chegando à avaliação e proposta de alternativas para a sua operação em rede aberta. Os elementos estudados e as propostas de controle foram avaliados a partir de resultados de simulações da operação do tráfego em interseções isoladas e em rede aberta.

Os estudos realizados permitiram identificar aspectos relevantes a serem considerados em futuros projetos de controladores semafóricos *fuzzy*, e ainda comprovaram a robustez do controlador originalmente concebido para a operação isolada. Este, quando empregado em rede aberta, apresentou resultados globais, em alguns casos, superiores aos resultados obtidos para o controle por tempo fixo coordenado. Por fim, a avaliação das propostas de cooperação dos controladores semafóricos *fuzzy* mostrou que, apesar dos resultados vantajosos já observados no controle em rede sem adaptações para essa operação, é possível melhorar o desempenho do controle global da rede em função do objetivo do controle, tal como, priorização do movimento arterial.

ABSTRACT
STUDIES ON FUZZY SIGNAL CONTROLLERS TO BE APPLIED IN OPEN
NETWORK OPERATION

Traffic-actuated signals constitute an attractive alternative for signalized intersections, being able to immediately react to demand fluctuations. When correctly employed, this type of signal usually reduces the negative effects of traffic control on the traffic streams (delays and stops), as well as on the environment (such as fuel consumption, emissions and noise).

The use of artificial intelligence techniques to find optimum phase lengths for traffic-actuated signals has been giving good results and, thus, has attracted the interest of many researchers in this field. Fuzzy signal controllers that are based on the principle of green extension, in particular, have been intensely studied with the objective of extend and improve the application of fuzzy logic as a tool for traffic control at intersections.

This thesis presents a set of studies on fuzzy signal controllers that use the concept of green extension. These studies include not just evaluations of the signal controller components (such as superposition patterns for fuzzy sets, structure of the fuzzy rules and type of fuzzy controller) but also the evaluation of alternatives for the operation of open traffic signal networks based on fuzzy controllers. These studies were based on simulations of isolated intersections and open networks.

The results of these studies indicated several aspects that should be considered in future studies and have demonstrated the robustness of fuzzy control on isolated intersections. In particular, the results suggest that isolated fuzzy control on intersections of an open network can be more effective than the traditional approach, which is based on fixed-time coordination. Simulation results have shown that the proposed strategy of cooperative fuzzy control on open networks is capable of giving better global performance than the use of isolated fuzzy control, when the objective is to prioritize movement along the arterial.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO	1
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA.....	2
1.3 HIPÓTESE.....	3
1.4 OBJETIVOS.....	3
1.5 JUSTIFICATIVA.....	4
1.6 METODOLOGIA ADOTADA.....	5
1.7 ESTRUTURA DA TESE.....	7
2. CONTROLE SEMAFÓRICO FUZZY	8
2.1 CONTROLE SEMAFÓRICO FUZZY	8
2.2 ESTADO-DA-ARTE DO CONTROLE SEMAFÓRICO FUZZY	9
2.2.1 Controle isolado	9
2.2.2 Controle em rede.....	15
2.3 ESTUDOS SOBRE ELEMENTOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY	20
2.3.1 Elementos dos controladores fuzzy	21
2.3.2 Formas de implementação de conectores fuzzy	23
2.3.3 Métodos de defuzzificação.....	23
2.3.4 Funções de pertinência.....	24
2.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	25
3 ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY	30
3.1 ESTUDO DO IMPACTO DE DIFERENTES SOBREPOSIÇÕES DOS CONJUNTOS FUZZY NOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS.....	30
3.1.1 Definição dos elementos de simulação.....	32
3.1.2 Influência na resposta de controle.....	33
3.1.3 Influência no desempenho do tráfego.....	38
3.2 ESTUDO COMPARATIVO DE CONTROLADORES DE MAMDANI E SUGENO PARA CONTROLE DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES ISOLADAS.....	39
3.2.1 Controlador de Mamdani.....	40
3.2.2 Controlador de Sugeno.....	41
3.2.3 Implementação dos controladores em programa computacional.....	42
3.2.4 Estudo de Caso 1.....	43
3.2.5 Análise dos Resultados obtidos do Estudo de Caso 1.....	48
3.3 AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DA BASE DE REGRAS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY	52
3.3.1 Controladores Semafóricos Fuzzy utilizados no estudo.....	53
3.3.2 Estudo de Caso 2.....	58
3.3.3 Análise dos Resultados Obtidos do Estudo de Caso 2.....	58
3.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	62
4 ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DA OPERAÇÃO EM REDE DO CONTROLE SEMAFÓRICO DO TIPO FUZZY	65
4.1 DEFINIÇÃO DOS MODELOS PARA SIMULAÇÃO.....	65
4.1.1 Características básicas do UnB-Sitracs.....	66
4.1.2 Definições dos elementos do modelo de simulação.....	70

4.2 SIMULAÇÕES.....	81
4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	82
4.3.1 Análise Global.....	83
4.3.2 Análise por tipo de via.....	96
4.3.3 Análise por interseção.....	103
4.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS	107
5 APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE REDE ARTERIAL UTILIZANDO	
CONTROLORES SEMAFÓRICOS FUZZY	109
5.1 ESTRATÉGIAS PARA A OPERAÇÃO DOS CONTROLORES SEMAFÓRICOS	
FUZZY EM REDE	109
5.1.1 Concepção	110
5.1.2 Definição dos modelos de simulação.....	112
5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	114
5.2.1 Análises relativas à Alternativa 1.....	115
5.2.2 Análises relativas à Alternativa 2	124
5.2.3 Análise conjunta dos resultados relativos à via arterial.....	132
5.3 TÓPICOS CONCLUSIVOS.....	136
6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	138
6.1 ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DE CONTROLORES SEMAFÓRICOS FUZZY	140
6.1.1 Estudo do impacto de sobreposições dos conjuntos <i>fuzzy</i> no controle semafórico.....	140
6.1.2 Estudos complementares à estrutura de controladores semafóricos <i>fuzzy</i>	142
6.2 ESTUDOS DE OPERAÇÃO DE REDES ARTERIAIS UTILIZANDO CONTROLORES	
SEMAFÓRICOS FUZZY	144
6.2.1 Estudos exploratórios da operação de redes com controladores semafóricos <i>fuzzy</i>	144
6.2.2 Aprimoramento da operação de rede arterial utilizando controladores semafóricos <i>fuzzy</i> ...	145
6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	147
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	150
APÊNDICE A - TABELAS DE EXTENSÕES FUZZY.....	155
APÊNDICE B - PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO TEMPO DE CICLO PARA O CONTROLE	
SEMAFÓRICO POR TEMPO FIXO PARA INTERSEÇÕES ISOLADAS.....	158
APÊNDICE C - RESULTADOS DOS ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DA OPERAÇÃO EM REDE	
DO CONTROLE SEMAFÓRICO DO TIPO FUZZY.....	166
APÊNDICE D - TABELAS E GRÁFICOS RELATIVOS AO ESTUDO DO APRIMORAMENTO	
DA OPERAÇÃO DE REDE ARTERIAL UTILIZANDO CONTROLORES	
SEMAFÓRICOS FUZZY	183

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Elementos básicos dos Controladores <i>Fuzzy</i>	22
Tabela 3.1	Limites dos conjuntos <i>fuzzy</i> dos casos estudados.....	33
Tabela 3.2	Principais vantagens dos métodos de Mamdani e Sugeno.....	40
Tabela 3.3	Opções disponíveis para inferência <i>fuzzy</i> no software MATLAB.....	43
Tabela 3.4	Base de regras do controlador <i>fuzzy</i>	45
Tabela 3.5	Operadores dos controladores <i>fuzzy</i> testados.....	45
Tabela 3.6	Volumes de tráfego simulados (dados em veículos/hora).....	48
Tabela 3.7	Diferença percentual entre os resultados dos controladores 1 e 2, e significância segundo o teste de Hipótese.....	51
Tabela 3.8	Diferença percentual entre os resultados dos controladores 3 e 4, e significância segundo o teste de Hipótese.....	51
Tabela 3.9	Base de regras do Controlador HUT.....	55
Tabela 3.10	Diferença percentual entre os resultados dos controladores HUT e HUT-RS3, e significância segundo o teste de Hipótese.....	61
Tabela 3.11	Diferença percentual entre os resultados dos controladores HUT e AJ-14R, e significância segundo o teste de Hipótese.....	62
Tabela 4.1	Medias de desempenho determinadas pelo UnB-Sitracs.....	68
Tabela 4.2	Distribuição de velocidade para a geração de veículos.....	70
Tabela 4.3	Volumes semafóricos e grau de saturação.....	71
Tabela 4.4	Volumes Veiculares Variáveis médios	72
Tabela 4.5	Composição veicular.....	72
Tabela 4.6	Caracterização operacional por tipo de veículo.....	73
Tabela 4.7	Configurações de redes do pré-teste.....	74
Tabela 4.8	Síntese da programação semafórica por nível de volume.....	79
Tabela 4.9	Defasagens dadas em relação à interseção 1, para as configurações de rede.....	80
Tabela 4.10	Caracterização da operação do Controlador Semafórico <i>Fuzzy</i>	80
Tabela 4.11	Resumo das variáveis de simulação.....	81
Tabela 4.12	Conjunto de sementes de inicialização das 30 horas de simulação.....	82
Tabela 4.13	Valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Wilcoxon para verificação da significância das diferenças das medidas de desempenho obtidas para o Volume Veicular Médio Médio e Volume Veicular Médio Variável.....	87
Tabela 4.14	Valores de p para os testes ANOVA e Wilcoxon, para verificação entre os modos de controle <i>Fuzzy</i> e Fixo Coordenado.....	91
Tabela 4.15	Valores de p para os testes ANOVA e Kruskal-Wallis, para verificação da significância estatística da diferença entre as redes, para medidas globais sob o controle <i>fuzzy</i>	93
Tabela 4.16	Diferenças entre os pares de redes.....	95
Tabela 4.17	Diferença percentual entre o atraso médio, para volume baixo, observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial.....	98
Tabela 4.18	Valores de p para os testes ANOVA e Wilcoxon, para verificação da significância estatística do modo de controle, para medidas por tipo de via.....	100
Tabela 4.19	Valores de p para os testes ANOVA e Kruskal-Wallis, para verificação da significância estatística da diferença entre as redes, para medidas por tipo de via sob o controle <i>fuzzy</i>	101
Tabela 4.20	Tempo médio de ciclo para cada interseção da rede, dados em segundos.....	103
Tabela 4.21	Varição Percentual do comprimento médio de ciclo de cada interseção em relação à interseção imediatamente anterior.....	105
Tabela 5.1	Resumo das variáveis de simulação.....	113
Tabela 5.2	Conjunto de sementes de inicialização das 30 horas de simulação.....	114

Tabela 5.3	Valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis para verificação da significância das diferenças das medidas de desempenho para a rede, Alternativa 1.....	118
Tabela 5.4	Melhor alternativa de peso para as aproximações da via arterial.....	120
Tabela 5.5	Alternativa 1: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis.....	123
Tabela 5.6	Alternativa 2: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis	127
Tabela 5.7	Melhor alternativa de distanciamento do detector de tráfego até a linha de retenção	127
Tabela 5.8	Alternativa 2: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis	130
Tabela 5.9	Melhor alternativa de distanciamento do detector de tráfego até a linha de retenção.....	131
Tabela 5.10	Diferença percentual entre atraso médio obtido pelas alternativas de controle <i>Fuzzy</i> em relação ao controle fixo coordenado.....	133
Tabela 5.11	Diferença percentual entre percentual de paradas médio obtido pelas alternativas de controle <i>fuzzy</i> em relação ao controle fixo coordenado.....	135
Tabela 5.12	Diferença percentual entre a média das paradas por veículo obtido pelas alternativas de controle <i>fuzzy</i> em relação ao controle fixo coordenado.....	136
Tabela A.1	Extensões <i>Fuzzy</i> do Controlador 1.....	156
Tabela A.2	Extensões <i>Fuzzy</i> do Controlador 2.....	156
Tabela A.3	Extensões <i>Fuzzy</i> do Controlador 3.....	157
Tabela A.4	Extensões <i>Fuzzy</i> do Controlador 4.....	157
Tabela B.1	Valores das variáveis para o cálculo dos entre verdes do modelo.....	160
Tabela B.2	Valores de Entre Verdes, tempo de Amarelo e de Vermelho Geral para o modelo.....	161
Tabela B.3	Síntese da programação semafórica por nível de volume.....	165
Tabela C.1	Diferença percentual entre o Atraso Médio observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial.....	169
Tabela C.2	Diferença percentual entre o Percentual de Paradas Veiculares observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial.....	169
Tabela C.3	Diferença percentual entre Paradas por Veículos observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial.....	170
Tabela C.4	Diferença percentual entre Tempo Médio de Verde observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial.....	170
Tabela C.5	Atraso Médio, para cada aproximação da rede, por tipo de controle.....	175
Tabela C.6	Percentual de Paradas Veiculares, para cada aproximação da rede, por tipo de controle.	176
Tabela C.7	Paradas por Veículo, para cada aproximação da rede, por tipo de controle.....	177
Tabela C.8	Tempo Médio de Verde para cada interseção da rede, por tipo de controle.....	178
Tabela C.9	Diferença Percentual e absoluta dos tempos de verde médios para as aproximações da via arterial obtidos sob controle <i>fuzzy</i> em relação ao tempo de verde médio para o controle por tempo fixo coordenado.....	179
Tabela C.10	Diferença Percentual e absoluta dos tempos de verde médios para as aproximações secundárias obtidos sob controle <i>fuzzy</i> em relação ao tempo de verde médio para o controle por tempo fixo coordenado.....	180
Tabela C.11	Valores de p para os testes ANOVA e WILCOXON, para verificação da significância estatística do modo de controle, para medidas por aproximação.....	181
Tabela D.1	Atraso Médio para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	236
Tabela D.2	Atraso Médio para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	236
Tabela D.3	Atraso Médio para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	236

Tabela D.4	Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	237
Tabela D.5	Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	237
Tabela D.6	Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	237
Tabela D.7	Paradas por Veículo para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	238
Tabela D.8	Paradas por Veículo para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	238
Tabela D.9	Paradas por Veículo para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação <i>fuzzy</i>	238

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1	Quadro resumo de estudos relacionados ao desenvolvimento de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i> para operação isolada e em rede.....	27
Quadro 5.1	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 111 para a Alternativa 1	119
Quadro 6.1	Resumo dos estudos desenvolvidos na pesquisa.....	139
Quadro D.1	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 111 para a Alternativa 1	226
Quadro D.2	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 131 para a Alternativa 1	227
Quadro D.3	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 313 para a Alternativa 1	228
Quadro D.4	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 333 para a Alternativa 1	229
Quadro D.5	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 111 para a Alternativa 1	230
Quadro D.6	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 131 para a Alternativa 1	231
Quadro D.7	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 313 para a Alternativa 1	232
Quadro D.8	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 333 para a Alternativa 1	233
QuadroD.9	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede para a Alternativa 2	234
QuadroD.10	Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial para a Alternativa 2	235

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Diagrama de um controlador <i>fuzzy</i>	9
Figura 2.2	Diagrama esquemático do controlador de Lee e Kwang.....	19
Figura 3.1	Conjuntos <i>fuzzy</i> de Fila e Chegada para o controlador semafórico <i>fuzzy</i> “padrão”.....	32
Figura 3.2	Conjuntos <i>fuzzy</i> de Fila e Chegada para o caso C113C.....	34
Figura 3.3	Superfície de controle do caso C113 ou padrão.....	35
Figura 3.4	Superfície de controle do caso C113C.....	35
Figura 3.5	Composição da tabela de extensões e a representação dos respectivos conjuntos de Fila e Chegada.....	36
Figura 3.6	Nulidade de variáveis e sua fuzyficação.....	37
Figura 3.7	Superfície de controle dos casos C113E e C113 F.....	38
Figura 3.8	Porcentagem de Paradas e Atraso Médio para as simulações realizadas.....	38
Figura 3.9	Conjuntos <i>fuzzy</i> de entrada do controlador básico.....	44
Figura 3.10	Conjuntos <i>fuzzy</i> da variável de saída do controlador de Mamdani.....	46
Figura 3.11	Base de regras e superfície de resposta do Controlador 3.....	46
Figura 3.12	Valores da variável de saída do controlador de Sugeno.....	47
Figura 3.13	Base de regras e superfície de resposta do Controlador 4.....	47
Figura 3.14	Superfícies de respostas dos controladores estudados.....	49
Figura 3.15	Variáveis de entrada e saída do Controlador HUT.....	54
Figura 3.16	Superfícies de resposta para cada grupo de regras independentes do Controlador HUT....	56
Figura 3.17	Valores Médios das medidas de desempenho para os controladores de base única de regras, derivados do Controlador HUT.....	59
Figura 4.1	Representação geral do trecho viário estudado.....	74
Figura 4.2	Atraso Média da via principal relativas ao pré-estudo de espaçamento entre interseções da rede de estudo.....	76
Figura 4.3	Percentual de paradas veiculares para a via principal relativas ao pré-estudo de espaçamento entre interseções da rede de estudo.....	77
Figura 4.4	Movimentos das duas fases semafóricas.....	79
Figura 4.5	Variação percentual dos atrasos médios globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede.....	85
Figura 4.6	Variação percentual dos percentuais de paradas veiculares globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede.....	86
Figura 4.7	Variação percentual das paradas por veículo globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede.....	87
Figura 4.8	Valores médios para as medidas de desempenho obtidos para os modos de controle Fixo Coordenado e <i>Fuzzy</i> , volumes alto, médio e baixo, para cada configuração de rede.....	89
Figura 4.9	Diferença Percentual entre as medidas de desempenho obtidas para o controle <i>Fuzzy</i> e o controle Fixo-coordenado.....	90
Figura 4.10	Valores médios para as medidas de desempenho obtidos para o controle <i>Fuzzy</i> ; volumes alto, médio e baixo, para cada configuração de rede.....	93
Figura 4.11	Diferença Percentual das medidas de desempenho obtidas para cada par de configurações de rede, sob controle <i>Fuzzy</i>	94
Figura 4.12	Atraso Médio para volume baixo, por tipo de via.....	98
Figura 4.13	Comparativo dos valores obtidos para o controle <i>Fuzzy</i> , para as estruturas de redes.....	102

Figura 4.14	Tempo médio de ciclo por aproximação, para os modos de controle Fixo-coordenado e <i>Fuzzy</i>	104
Figura 5.1	Representação do aumento da área de avaliação do controlador semafórico <i>fuzzy</i> para uma aproximação da via arterial.....	112
Figura 5.2	Atraso Médio para a rede 111, Alternativa 1.....	116
Figura 5.3	Percentual de Paradas Veiculares para a rede 111, Alternativa 1.....	116
Figura 5.4	Número de Paradas por Veículo para a rede 111, Alternativa 1.....	117
Figura 5.5	Atraso Médio por tipo de via para rede 111, Alternativa 1.....	121
Figura 5.6	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via para rede 111, Alternativa 1.....	122
Figura 5.7	Número de Paradas Veiculares por tipo de via para rede 111, Alternativa 1.....	122
Figura 5.8	Atraso Médio para rede 333, Alternativa 2.....	125
Figura 5.9	Percentual de Paradas Veiculares para rede 333, Alternativa 2.....	125
Figura 5.10	Número de Paradas Veiculares para rede 333, Alternativa 2.....	126
Figura 5.11	Atraso Médio por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2.....	128
Figura 5.12	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2.....	129
Figura 5.13	Número de Paradas Veiculares por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2.....	129
Figura B-1	Fluxograma de cálculo do tempo de ciclo.....	159
Figura C-1	Atraso Médio por tipo de via.....	167
Figura C-2	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via.....	167
Figura C-3	Paradas por Veículo por tipo de via.....	168
Figura C-4	Tempo de Verde médio por tipo de via.....	168
Figura C-5	Atraso Médio por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	171
Figura C-6	Atraso Médio por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	171
Figura C-7	Percentual de paradas veiculares por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	172
Figura C-8	Percentual de paradas veiculares por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	172
Figura C-9	Paradas por veículo por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	173
Figura C-10	Paradas por veículo por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	173
Figura C-11	Tempo Médio de Verde por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	174
Figura C-12	Tempo Médio de Verde por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e <i>fuzzy</i>	174
Figura D-1	Atraso Médio para a rede 111.....	184
Figura D-2	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio para a rede 111.....	184
Figura D-3	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 111.....	185
Figura D-4	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 111.....	185
Figura D-5	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 111.....	186
Figura D-6	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 111.....	186
Figura D-7	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 111.....	187

Figura D-8	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 111.....	187
Figura D-9	Paradas por Veículo para a rede 111.....	188
Figura D-10	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo para a rede 111.....	188
Figura D-11	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 111.....	189
Figura D-12	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 111.....	189
Figura D-13	Atraso Médio para a rede 131.....	190
Figura D-14	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio para a rede 131.....	190
Figura D-15	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131.....	191
Figura D-16	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131.....	191
Figura D-17	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131.....	192
Figura D-18	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131.....	192
Figura D-19	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131.....	193
Figura D-20	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131.....	193
Figura D-21	Paradas por Veículo para a rede 131.....	194
Figura D-22	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo para a rede 131.....	194
Figura D-23	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131.....	195
Figura D-24	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131.....	195
Figura D-25	Atraso Médio para a rede 313.....	196
Figura D-26	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio para a rede 313.....	196
Figura D-27	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313.....	197
Figura D-28	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313.....	197
Figura D-29	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313.....	198
Figura D-30	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313.....	198
Figura D-31	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313.....	199
Figura D-32	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313.....	199
Figura D-33	Paradas por Veículo para a rede 313.....	200
Figura D-34	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo para a rede 313.....	200
Figura D-35	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313.....	201
Figura D-36	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313.....	201
Figura D-37	Atraso Médio para a rede 333.....	202
Figura D-38	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio para a rede 333.....	202
Figura D-39	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333.....	203

Figura D-40	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333.....	203
Figura D-41	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333.....	204
Figura D-42	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333.....	204
Figura D-43	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333.....	205
Figura D-44	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333.....	205
Figura D-45	Paradas por Veículo para a rede 333.....	206
Figura D-46	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo para a rede 333.....	206
Figura D-47	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333.....	207
Figura D-48	Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso $p-1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333.....	207
Figura D-49	Atraso Médio para a rede 131.....	208
Figura D-50	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Atraso Médio	208
Figura D-51	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131.....	209
Figura D-52	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131.....	209
Figura D-53	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131.....	210
Figura D-54	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131.....	210
Figura D-55	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131.....	211
Figura D-56	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131.....	211
Figura D-57	Paradas por Veículo, para a rede 131.....	212
Figura D-58	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Paradas por Veículo, para a rede 131.....	212
Figura D-59	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131.....	213
Figura D-60	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131.....	213
Figura D-61	Atraso Médio para a rede 313.....	214
Figura D-62	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Atraso Médio para a rede 313.....	214
Figura D-63	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313.....	215
Figura D-64	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313.....	215
Figura D-65	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313.....	216
Figura D-66	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313.....	216
Figura D-67	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313.....	217
Figura D-68	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313.....	217
Figura D-69	Paradas por Veículo, para a rede 313.....	218
Figura D-70	Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso $LR-100$ para Paradas por Veículo, para a rede 313.....	218
Figura D-71	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313.....	219

Figura D-72	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313.....	219
Figura D-73	Atraso Médio para a rede 333.....	220
Figura D-74	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Atraso Médio para a rede 333.....	220
Figura D-75	Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333.....	221
Figura D-76	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333.....	221
Figura D-77	Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333.....	222
Figura D-78	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333.....	222
Figura D-79	Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333.....	223
Figura D-80	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333.....	223
Figura D-81	Paradas por Veículo, para a rede 333.....	224
Figura D-82	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Paradas por Veículo, para a rede 333.....	224
Figura D-83	Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333.....	225
Figura D-84	Diferença percentual de cada caso de <i>LR</i> em relação ao caso <i>LR-100</i> para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333.....	225

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E ACRÔNIMOS

AM	- Atraso Médio
AM_P	- Atraso Médio para a via Principal
AM_Rd	- Atraso Médio para a Rede
AM_S	- Atraso Médio para a via Secundária
AM_Tot_Art VA	- Atraso Médio Total para via Arterial, com volume veicular alto
AM_Tot_Art VB	- Atraso Médio Total para via Arterial, com volume veicular baixo
AM_Tot_Art VM	- Atraso Médio Total para via Arterial, com volume veicular médio
AM_Tot_Sec VA	- Atraso Médio Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular alto
AM_Tot_Sec VB	- Atraso Médio Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular baixo
AM_Tot_Sec VM	- Atraso Médio Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular médio
ANOVA	- <i>Analysis Of Variance</i>
App	- Aproximação
COG	- <i>Center of Gravity</i>
CoopFuz A1	- Cooperação de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i> pelo Método A1
CoopFuz A2	- Cooperação de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i> pelo Método A2
Cont.	- Continuação
DENATRAN	- Departamento Nacional de Trânsito
En	- Extensão "n"
Eq.	- Equação
EV	- Tempo de Entre-Verdes
FixCoord	- Controle Fixo-Coordenado
FLC	- <i>Fuzzy Logic Control</i>
FLMuSiC	- <i>Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control</i>
FUSICO	- <i>FUZZY Signal COntrol</i>
GMP	- <i>Generalized Modus Ponens</i>
HUT	- <i>Helsinki University of Technology</i>
HUTSIM	- <i>Helsinki University of Technology Simulator</i>
IA	- Inteligência Artificial
km/h	- Quilômetros por hora
L-O	- sentido Leste-Oeste
LR	- Linha de Retenção
m	- Metros
MATLAB	- <i>MATrix LABoratory (Software)</i>
MAX	- Máximo
MIN	- Mínimo
MOM	- <i>Mean Of Maximum</i>
NEFCON	- <i>Neuro-Fuzzy Control</i>
N-S	- sentido Norte-Sul
Par/V	- Paradas por Veículos
Par/V_Tot_Art VA	- Paradas por Veículos Total para via Arterial, com volume veicular alto
Par/V_Tot_Art VB	- Paradas por Veículos Total para via Arterial, com volume veicular baixo
Par/V_Tot_Art VM	- Paradas por Veículos Total para via Arterial, com volume veicular médio
Par/V_Tot_Sec VA	- Paradas por Veículos Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular alto
Par/V_Tot_Sec VB	- Paradas por Veículos Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular baixo

Par/V_Tot_Sec VM	- Paradas por Veículos Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular médio
Par/Veh_P	- Paradas por Veículos para a via Principal
Par/Veh_Rd	- Paradas por Veículos para a Rede
Par/Veh_S	- Paradas por Veículos para a via Secundária
Princ.	- Principal
Prod	- Produto
s	- Segundos
Sec.	- Secundária
seg	- Segundos
SIDRA	- <i>Signalized and Unsignalized Intersection Signalized and Unsignalized Intersection Design and Research Aid</i>
SOM	- <i>Smallest Of Maximum</i>
T	- Tempo Perdido
TAM	- Tempo de Amarelo
Verde_Tot_Art VA	- Tempo Médio de Verdes Total para via Arterial, com volume veicular alto
Verde_Tot_Art VB	- Tempo Médio de Verdes Total para via Arterial, com volume veicular baixo
Verde_Tot_Art VM	- Tempo Médio de Verdes Total para via Arterial, com volume veicular médio
Verde_Tot_Sec VA	- Tempo Médio de Verdes Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular alto
Verde_Tot_Sec VB	- Tempo Médio de Verdes Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular baixo
Verde_Tot_Sec VM	- Tempo Médio de Verdes Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular médio
VG	- Tempo de vermelho geral
Volume A	- Volume Alto
Volume M	- Volume Médio
Volume B	- Volume Baixo
VPH	- Veículo por Hora
VVMm	- Volume Veicular Médio Médio
VVMv	- Volume Veicular Médio Variável
X	- Grau de Saturação
%Par_P	- Percentual de Paradas Veiculares para a via Principal
%Par_Rd	- Percentual de Paradas Veiculares para a Rede
%Par_S	- Percentual de Paradas Veiculares para a via Secundária
%Par_Tot_Art VA	- Percentual de Paradas Veiculares Total para via Arterial, com volume veicular alto
%Par_Tot_Art VB	- Percentual de Paradas Veiculares Total para via Arterial, com volume veicular baixo
%Par_Tot_Art VM	- Percentual de Paradas Veiculares Total para via Arterial, com volume veicular médio
%Par_Tot_Sec VA	- Percentual de Paradas Veiculares Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular alto
%Par_Tot_Sec VB	- Percentual de Paradas Veiculares Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular baixo
%Par_Tot_Sec VM	- Percentual de Paradas Veiculares Total para o conjunto de vias Secundárias, com volume veicular médio
%PV	- Percentual de Paradas Veiculares

1. INTRODUÇÃO

1.1. APRESENTAÇÃO

Dentre as alternativas para a ordenação dos movimentos veiculares e de pedestres, a utilização dos semáforos destaca-se como uma solução necessária para diversas situações de tráfego, em especial nos centros urbanos. Esses elementos são utilizados de diferentes formas em função das necessidades do ambiente controlado. Nesse sentido os semáforos podem ser programados para operar de forma isolada ou em rede com semáforos das interseções adjacentes. A forma de atribuição dos tempos semaforicos é definida em função das condições do tráfego. Programações por tempo fixo ou atuadas pelo tráfego são as alternativas possíveis para o controle. O controle semaforico atuado pelo tráfego é vantajoso, especialmente para regiões que apresentam grandes variações dos volumes veiculares, uma vez que tempos de verde inadequados dados para algumas aproximações (excessivos ou insuficientes para atender a demanda) podem acarretar grandes prejuízos para as aproximações concorrentes e, em geral, para a rede semaforica como um todo.

Apesar dos controladores semaforicos modernos permitirem a implementação de planos de tempos fixos diferenciados ao longo do dia, de modo a atender às principais variações nos volumes de tráfego, a elaboração e atualização desses planos requer um grande esforço de coleta e tratamento de dados de volumes de veículos e pedestres por parte dos órgãos gestores (Bonetti Jr e Pietrantonio, 2006). Por essa razão, a utilização de planos de tempo fixo devidamente ajustados à demanda nem sempre é encontrada. Além disso, por mais atualizados que esses planos estejam, situações imprevistas ocorridas na circulação do tráfego não podem ser por eles gerenciadas.

Outro aspecto relevante abrange o contexto viário predominante nos ambientes urbanos. Em geral, as interseções que demandam por controle semaforico são localizadas próximas umas às outras, configurando uma rede. Esses ambientes podem apresentar situações de tráfego que requerem controle semaforico do tipo atuado, cuja operação em rede é tanto mais difícil quanto maior for a flexibilidade do controle permitida ao controlador de cada interseção. No caso dos controladores atuados que usam técnicas de Inteligência Artificial (IA), a questão da operação em rede ainda não foi suficientemente explorada. Os estudos existentes, em geral, revelam sistemas de controle que utilizam ferramentas

computacionais robustas que necessitam uma grande variedade de dados de estado do sistema para realizar o controle. Estes dados, embora facilmente obtidos via programas de simulação, no estágio atual dos sistemas de detecção de tráfego e dos próprios equipamentos de controle, não viabilizam a implementação dos sistemas propostos no curto e médio prazos.

A utilização da lógica *fuzzy* para o controle atuado pelo tráfego tem apresentado resultados promissores, especialmente para a operação semafórica isolada (Niittymäki e Nevala, 2001). Devido a tais resultados, estudos adicionais acerca do impacto da variação de elementos dos controladores *fuzzy* na resposta do controlador e na operação do tráfego vêm sendo realizados para tornar a concepção destes controladores mais orientada em termos teóricos específicos para a área de aplicação (Jacques *et al.*, 2002b, 2002c). É importante ressaltar que os controladores *fuzzy* possuem um grande número de elementos variáveis, permitindo diferentes alternativas que devem ser investigadas para aplicações no controle semafórico.

Da mesma forma que para os demais controladores baseados em técnicas de IA, a operação de controladores semafóricos *fuzzy* em rede também ainda se encontra em fase inicial. Assim, pesquisas voltadas à definição de estratégias de controle em rede, que permitam extrair o melhor da operação do controlador *fuzzy* em nível isolado e, ao mesmo tempo, viabilizem a sua utilização em rede, são necessárias. Somente a partir das mesmas será possível consolidar o uso dos controladores semafóricos *fuzzy* como alternativa viável para o controle do tráfego em áreas urbanas.

1.2. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Algumas situações do tráfego urbano e configurações do sistema viário podem demandar a implantação de um conjunto de controladores semafóricos atuados agrupados numa determinada área. A demanda por um controlador atuado se dá devido a características da operação do tráfego na interseção analisada de forma isolada. Por outro lado, a configuração de área onde estes controladores estão inseridos pode exigir uma estrutura de controle coordenada com vistas a promover a otimização da operação em rede.

O controlador semafórico *fuzzy* é um dos tipos de controladores totalmente atuados cuja utilização para o controle de interseções isoladas tem apresentado resultados bastante

satisfatórios, tanto em estudos teóricos (usando técnicas de simulação) quanto em aplicações práticas, como as realizadas na Finlândia (Niittymäki, 2001). Esses controladores, no entanto, operam variando elementos de referência para o estabelecimento da coordenação semafórica, tais como, comprimento de ciclo e intervalos, tornando, sua coordenação nos moldes da coordenação para semáforos por tempo fixo, inviável. Sendo assim, é importante investigar uma forma de promover a “cooperação” dos controladores semafóricos *fuzzy* para que eles possam se tornar uma alternativa viável para o controle totalmente atuado do tráfego.

1.3. HIPÓTESE

Com menor necessidade de coleta de dados, estratégias de cooperação para operação em rede aberta de controladores semafóricos *fuzzy* asseguram resultados melhores que os obtidos por planos de tempo fixo coordenado.

1.4. OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é desenvolver uma alternativa de cooperação para a operação em rede aberta com o uso de controladores atuados do tipo *fuzzy* que utilizam o princípio da extensão. Essa cooperação visa alcançar uma operação de controladores *fuzzy* similar à operação coordenada de controladores de tempo fixo no aspecto da promoção da fluidez na via arterial.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Realizar estudos voltados ao aperfeiçoamento de controladores semafóricos *fuzzy* operando de forma isolada.
- Verificar o benefício potencial da cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* para o desempenho do tráfego.
- Conceber o procedimento de cooperação semafórica para controladores atuados do tipo *fuzzy*, definindo as variáveis de controle que farão parte do processo decisório e da avaliação de desempenho da estrutura coordenada, e identificar as ferramentas possíveis de viabilizar o referido procedimento.
- Avaliar o procedimento proposto através de um estudo de simulação da operação do tráfego em rede sob o controle proposto.

1.5. JUSTIFICATIVA

As situações de tráfego atuais, somadas às diferentes composições viárias dos centros urbanos, culminam, freqüentemente, em grupos de interseções seqüenciadas que demandam pelo controle do tipo atuado. Algumas situações de seqüenciamento semafórico necessitam de coordenação, especialmente se as interseções controladas são localizadas em vias arteriais, sob pena de prejudicar a operação de toda a área de influência dessa artéria no sistema viário em questão.

Diversas estruturas adaptativas já foram desenvolvidas utilizando técnicas numéricas e controle centralizado informatizado (utilizando informações volumétricas oriundas de contadores de tráfego, sensores, bem como informações visuais oriundas de câmeras instaladas em pontos estratégicos) e que são tradicionalmente utilizadas no controle semafórico em rede, tais como, o sistema SCOOT, SCATS, SOS, dentre outros. OPAC, PROLYN, UTOPIA são exemplos de sistemas adaptativos não centralizados. O PROLYN, por exemplo, é alimentado com informações das interseções adjacentes, simula os resultados possíveis com o cenário preeminente, e toma a decisão acerca da continuidade, ou não, da fase corrente (Kronborg *et al.*, 1997; Lowrie, 1992; Martin *et al.*, 2003; SCOOT 2.4, 1993).

Outra linha de investigação vem testando alternativas de controladores semafóricos adaptativos para a operação isolada e em rede. Tais trabalhos são comumente desenvolvidos por centros de ciência de computação que buscam, preferencialmente, situações práticas para comprovar a eficiência das diversas ferramentas computacionais robustas e adequadas para utilização em sistemas de controle complexos, como é o caso do controle semafórico (De Re, 1995; Bazzan, 2005; Grégoire *et al.*, 2007; dentre outros). As principais ferramentas aplicadas em tais estudos são oriundas da Inteligência Artificial e, não raro apresentam resultados promissores quando avaliados em ambientes virtuais. O principal problema é que esses sistemas normalmente demandam por informações do ambiente controlado difíceis de serem obtidas em campo, o que freqüentemente inviabiliza a utilização prática dos sistemas desenvolvidos nessas pesquisas. Os controladores semafóricos *fuzzy*, entretanto, já foram testados com sucesso tanto em aplicações práticas quanto teóricas. Suas variáveis de entrada e saída são de fácil compreensão pelo técnico, bem como a definição dos valores que elas podem assumir (valores lingüísticos). A construção conceitual inicial da base de regras do controlador e dos conjuntos *fuzzy* associados a cada valor lingüístico, pode ser realizada por meio de técnicas de consulta a

especialistas, baseadas em situações concretas da operação do tráfego. A definição dos diferentes elementos que levam à estrutura completa do controlador pode ser feita mediante a aplicação de técnicas computacionais disponíveis que permitem selecionar o melhor controlador para uma dada condição de controle.

No entanto, o uso de controladores semafóricos *fuzzy* em rede ainda não foi suficientemente estudada. É de se esperar que uma solução que use recursos de lógica *fuzzy* também possa levar a uma situação favorável de controle em rede. Essa solução deve, inicialmente, evitar que os controladores *fuzzy* deixem de ser efetivos em nível de uma dada interseção por não levar em conta as condições do tráfego a jusante (por exemplo, liberando veículos para um segmento viário congestionado), ou que levem a um número excessivo de paradas os veículos que trafegam em uma via arterial, na qual a circulação do tráfego deva ser priorizada.

1.6. METODOLOGIA ADOTADA

No sentido de alcançar os objetivos definidos para o estudo, foram realizadas as atividades dispostas em cinco etapas, descritas a seguir.

1.6.1 Revisão teórica

A revisão teórica realizada foi composta de duas sub-etapas, referentes a: (i) o estado-da-arte de controladores semafóricos *fuzzy*, que aborda tanto as estratégias de controle isolado como em rede; e (ii) a revisão dos principais estudos relacionados aos elementos dos controladores semafóricos *fuzzy*, que passa pela definição dos principais elementos destes controladores, estudos relacionados às formas de implementação de conectores *fuzzy*, métodos de defuzificação e estudo de funções de pertinência. A avaliação dos trabalhos que compuseram esta revisão teórica permitiu a identificação de brechas para novos estudos relacionados aos elementos dos controladores semafóricos *fuzzy*, bem como a visualização do cenário atual destes controladores na operação em rede, suas limitações e sucessos dos métodos já adotados. Esses elementos são fundamentais para o processo de idealização e avaliação de novas propostas, como as apresentadas nesta tese.

1.6.2 Grupo de Estudos 1

Esta etapa foi elaborada com o objetivo de complementar o conjunto de estudos relacionados aos elementos dos CSF (Controladores Semafóricos *Fuzzy*) revistos na etapa anterior e, assim, ampliar o entendimento dos elementos que compõem estes controladores.

Foram analisados os impactos causados pelos diferentes elementos na resposta destes controladores e no desempenho do tráfego. Para tanto, esta etapa contempla três estudos relacionados aos CSF, sendo: (i) a avaliação do impacto de diferentes sobreposições dos conjuntos *fuzzy* nos CSF; (ii) o estudo comparativo dos controladores de Mamdani e de Sugeno para CSF; e (iii) a avaliação dos impactos da utilização de diferentes estruturas de base de regras nos CSF (base de regras única ou base de regras particionada). Uma vez que este conjunto de estudos tem o propósito de avaliar o impacto das alternativas em teste na resposta do controlador e no desempenho do tráfego, foram efetuados estudos de simulação de tráfego (microsimulação) para a operação isolada destes controladores e a aplicação de testes de significância estatística para os resultados obtidos.

Essa etapa foi de grande relevância para este trabalho, uma vez que a utilização de um controlador *fuzzy* mais robusto contribuiu para o sucesso da proposta principal em questão, que é o controle do tráfego em rede utilizando CSF.

1.6.3 Grupo de Estudos 2

Alcançando a temática principal da tese, o Grupo de Estudos 2 compreendeu avaliações, em diferentes níveis, relacionadas à operação em rede aberta utilizando o CSF originalmente concebido para a operação isolada, comparadas à operação realizada por controladores semafóricos por tempo fixo operando de modo coordenado. O objetivo deste conjunto de estudos foi verificar a capacidade adaptativa dos CSF quando submetidos à operação em rede, sob análise da rede como um todo e sob o aspecto da promoção da fluidez ao longo da via arterial. As avaliações propostas foram viabilizadas por meio de estudos de simulação do tráfego e análises descritivas e de significância estatística. Os resultados obtidos nesta etapa levaram à identificação da necessidade de um mecanismo para o estabelecimento da “cooperação” de CSF na operação em rede, e ainda constituíram-se no principal suporte para a elaboração de propostas de cooperação destes controladores.

1.6.4 Proposta de Cooperação de CSF

Esta etapa visa a apresentação e avaliação de duas alternativas de cooperação de CSF: (i) a atribuição de pesos à via arterial; e (ii) o aumento da área de avaliação do controlador *fuzzy*. A avaliação das alternativas propostas foi realizada através de análises descritivas e de significância estatísticas dos resultados de simulação do tráfego.

1.6.5 Análises e Conclusões

A etapa final dessa pesquisa é composta das análises relacionadas aos estudos realizados ao longo do trabalho frente ao problema apresentado, à hipótese lançada e ao disponível na literatura; da apresentação dos principais resultados alcançados e das recomendações para estudos futuros.

1.7. ESTRUTURA DA TESE

A tese aqui apresentada é composta por seis capítulos. O Capítulo 1 traz os aspectos introdutórios do trabalho, tais como problematização, objetivos, metodologia e estrutura do trabalho. O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica acerca dos principais temas abordados na pesquisa desenvolvida, ou seja, o estado-da-arte dos controladores semafóricos *fuzzy*, e estudos relacionados aos principais elementos que compõem estes controladores. O Capítulo 3 apresenta um conjunto de estudo exploratório acerca dos controladores semafóricos *fuzzy*, e o Capítulo 4 é composto de testes e análises que visam justificar o estudo proposto bem como subsidiar o processo de concepção da proposta do trabalho. O Capítulo 5 traz duas alternativas para proposta da tese e os testes e análises realizados para a avaliação das concepções apresentadas. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo realizado em termos de contribuições e limitações; sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2. CONTROLE SEMAFÓRICO *FUZZY*

O presente capítulo traz uma revisão da literatura acerca do objeto de estudo deste trabalho, ou seja, os controladores semafóricos *fuzzy*. O capítulo tem início com a origem deste tipo de controlador semafórico e as justificativas para sua utilização. Na seqüência é apresentada uma revisão dos principais estudos relacionados ao controle semafórico *fuzzy*, finalizando o capítulo com a apresentação de investigações acerca dos elementos que compõem esses controladores.

2.1. CONTROLE SEMAFÓRICO *FUZZY*

Em 1973 Zadeh lançou as bases para a utilização da lógica *fuzzy* na análise de sistemas e processos de decisão cuja complexidade não permitia a utilização de técnicas matemáticas convencionais. Nesse trabalho foi cunhado o termo algoritmo *fuzzy*, definido como “um conjunto ordenado de instruções *fuzzy* cuja execução produz uma solução aproximada para um determinado problema” (Zadeh, 1973, 2008). De acordo com Kikuchi (1991), o emprego de algoritmos *fuzzy* para a abordagem e solução de problemas na área de transportes se justifica em função do grau de incerteza associado a vários desses problemas, como é o caso do controle do tráfego em interseções semaforizadas.

Os controladores semafóricos *fuzzy* começaram a ser desenvolvidos e testados a partir do controlador pioneiro de Pappis e Mamdani (1977), proposto para uma interseção isolada com duas aproximações de sentido único de tráfego e controle bifásico. O procedimento de controle foi implementado em um simulador e comparado ao modelo veículo-atuado (princípio clássico da extensão de tempo de verde), obtendo atrasos médios 20% menores para o controle *fuzzy*.

O controlador semafórico *fuzzy*, que possui um módulo de tomada de decisão *fuzzy*, demanda informações do meio para subsidiar seu módulo de inferência. A lógica de tomada de decisão desses controladores é, em sua maioria, composta da comparação do volume veicular que chega na aproximação que recebe verde com a fila formada na outra aproximação. Com base nessa informação o controlador decide por estender ou não o verde da aproximação. A decisão por não prolongar o verde resulta na mudança de estado do sistema, ou seja, a mudança de fase (Favilla *et al.*, 1993) (Figura 2.1).

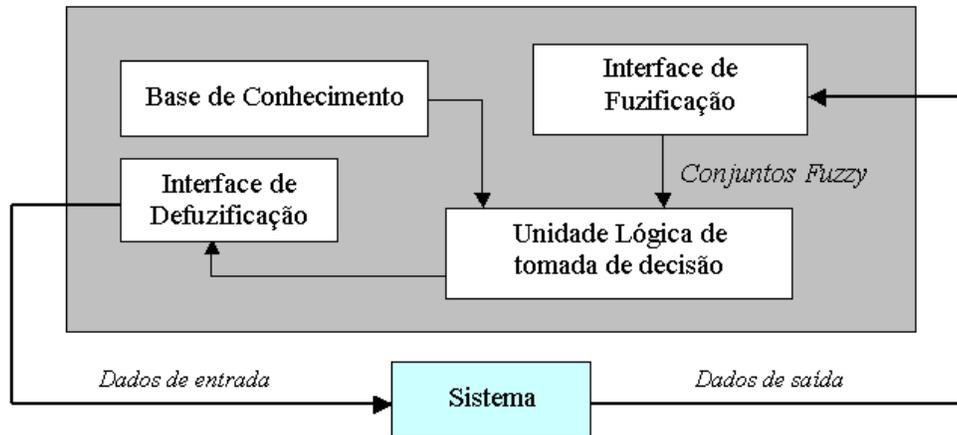


Figura 2.1 Diagrama de um controlador *fuzzy* (Fonte: Niittymäki,1998)

A possibilidade da utilização de instruções de controle lingüísticas para o controle semafórico somada aos resultados obtidos por Pappis e Mamdani (1977) levaram outros pesquisadores a investigar o uso da lógica *fuzzy* para o controle semafórico de modo mais abrangente. Estudos desenvolvidos por Chiu e Chand (1993), Favilla *et al.*, (1993), Sayers *et al.* (1996), Niittymäki e Pursula (2000), Murat e Gedizlioglu (2002), são alguns dos exemplos dos sistemas de controle semafórico *fuzzy* disponíveis na literatura, e apresentados em mais detalhes na próxima seção. Alguns deles são do tipo Mamdani e outros do tipo Sugeno. Detalhes sobre esses dois tipos genéricos de controladores *fuzzy* são apresentados no Capítulo 3 desta tese.

2.2. ESTADO-DA-ARTE DO CONTROLE SEMAFÓRICO FUZZY

Os controladores semafóricos *fuzzy* vêm sendo investigados em função da facilidade de implementação somada aos resultados promissores obtidos nos estudos e nos testes de campo. É possível identificar diferentes abordagens para o controle semafórico *fuzzy* disponíveis na literatura. Além da estrutura de controle, as investigações passam pela avaliação destas para as estratégias de controle semafórico: controle isolado, em rede aberta e fechada.

2.2.1 Controle isolado

Como já mencionado, o estudo pioneiro na utilização da lógica *fuzzy* para o controle semafórico foi apresentado por Pappis e Mamdani em 1977. O modelo proposto nessa

ocasião foi concebido para o controle de uma interseção isolada, com duas faixas por aproximação e sentido único de tráfego, sem movimentos de conversão. O controlador apresentado segue o princípio clássico da extensão, em que as extensões de tempo de verde dadas ao sistema são obtidas através de uma inferência *fuzzy*.

Alguns controladores semafóricos *fuzzy* para o controle isolado disponíveis na literatura seguem basicamente a mesma estrutura do controlador de Pappis e Mamdani (1977) relativamente à resposta do controlador (extensão de tempo de verde) e às variáveis de entrada (fila e chegada) (Favilla *et. al.*, 1993; Kim, 1997; Niittymäki e Pursula, 2000). Há também estruturas diferenciadas de controladores que definem a extensão de tempo de verde a partir de outras variáveis de entrada, e ainda controladores que definem se haverá ou não extensão (que é fixa) e seqüência de fases para o ciclo (Murat e Gedizlioglu, 2002).

a) Controlador de Pappis e Mamdani (1977)

O controlador de Pappis e Mamdani (1977) é baseado no princípio clássico da extensão que é utilizado para controle atuado pelo tráfego. A determinação da extensão *fuzzy* é feita pelo método de tomada de decisão baseado em regras do tipo “**SE A ENTÃO B**”, nas quais tanto o antecedente quanto o conseqüente são valores lingüísticos, expressos por meio de conjuntos *fuzzy* (funções do tipo triangular e trapezoidal)(Mamdani e Assilian, 1975). Segue, a título de ilustração, uma regra do controlador de Pappis e Mamdani, e o significado de cada uma das variáveis que a compõe.

Se : **T** é “muito curto” e **A** é “maior que nada” e **Q** é “qualquer”

Então : **E** é “muito curto”

Em que:

T: variável *fuzzy* de tempo que indica o tempo correspondente à previsão das filas e chegadas (intervalo de variação de 1 a 10 segundos);

A: número de veículos que passaram pela aproximação que está recebendo a indicação verde;

Q: número de veículos que aguardam na aproximação que está recebendo a indicação vermelha;

E: é o tempo de extensão dado à fase que está recebendo a indicação verde (este valor é classificado de modo idêntico ao valor de “*T*”).

O controlador é estruturado com um total de 25 regras (5 regras para cada intervenção). Cada regra representa uma relação *fuzzy* das variáveis de entrada (T, A e Q) com a variável de saída (E). Os conectivos “e” e “também” são implementados como operadores “*min*” e “*max*”, respectivamente. O controlador permite que, após os 7 segundos iniciais do tempo de verde de cada fase, sejam concedidas no máximo cinco extensões. Se no cálculo da duração de uma extensão o valor encontrado for inferior a 10 segundos, ao final da extensão ocorre a troca de fase.

A avaliação do desempenho do controlador semafórico *fuzzy* foi feita a partir da simulação de uma interseção isolada. Os atrasos médios veiculares foram obtidos para simulações realizadas para o modelo veículo-atuado e para o controlador *fuzzy* proposto. Um total de 16 condições de tráfego diferentes foi simulado para as formas de controle propostas, sendo cada simulação de 2 horas contínuas. Os resultados obtidos comprovaram a eficiência do modelo proposto que obteve atrasos médios em torno de 20% menores que os obtidos pelo controle veículo-atuado.

b) Controlador de Favilla et al. (1993)

O trabalho de Favilla *et al.* (1993) apresenta um Controlador de Tráfego *Fuzzy* (FTC – *Fuzzy Traffic Control*) com estratégias adaptativas para sistemas de controle *fuzzy* de tráfego urbano. Este controlador é composto de três módulos: (i) controlador *fuzzy*, responsável pela definição das extensões de tempo de verde dadas à aproximação que está sendo servida; (ii) máquina de estado, controla a seqüência das fases e (iii) adaptação dos conjuntos *fuzzy* do controlador que ajusta as funções de pertinência segundo um critério pré-estabelecido. Os três módulos necessitam de dados do sistema relativos ao número de veículos nas aproximações da interseção controlada. O controlador *fuzzy* foi definido com as variáveis de entrada e de saída do tipo *fuzzy*, assim, trata-se de um controlador de Mamdani. Todas as funções utilizadas são do tipo triangular.

O trabalho apresentou dois métodos de adaptação para os conjuntos *fuzzy*, sendo (i) adaptação estatística, que é aplicada aos antecedentes das regras (fila e chegada) e adaptação *fuzzy*, que é aplicada ao conseqüente das regras (extensão). Os testes realizados para avaliação do sistema proposto consistiram de simulações realizadas para uma interseção da cidade de São Paulo para o modo de decisão proposto nesse trabalho e para o modo de decisão desenvolvido por Pappis e Mamdani. Os dois modos foram testados para

(i) o modo não-adaptativo, (ii) a adaptação estatística e (iii) para a adaptação *fuzzy*. Os resultados do estudo mostraram que o modo de decisão proposto neste trabalho foi superior em todos os testes aos resultados obtidos através do modo proposto por Pappis e Mamdani (1977). O esquema de adaptação *fuzzy* apresentou os melhores resultados em termos de atraso médio para todos os casos testados, o que levou os pesquisadores a sugerir estudos no sentido de investigar possibilidades de desenvolvimento de sistemas adaptativos mais robustos.

c) Controlador de S. Kim (Kim, 1994)

Kim (1994¹, *apud*, Niittymäki, 1998) também desenvolveu um algoritmo *fuzzy* para interseção isolada, no entanto, tratando também de situações de conversões. Diferentemente do que ocorre nos trabalhos já citados, o algoritmo *fuzzy* proposto ajusta a duração do tempo de verde através de avaliações das condições de tráfego ao fim de cada fase. O tempo de verde de cada fase é dividido em um número de intervalos.

O modelo proposto é apto a controlar semáforos que operam com até quatro 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 cinco intervenções para cada fase, sendo que o valor de cada extensão pode variar entre zero (0) e dez (10) segundos. A distância dos detectores de tráfego até a linha de retenção é 61 m.

O conjunto *fuzzy* de saída (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. Assim, o modelo proposto é concebido por um controlador *fuzzy* do tipo Sugeno.

Testes realizados por meio de simulações do controlador *fuzzy* foram comparados a resultados obtidos pelo controle por tempo fixo, tendo apresentado uma melhora que variou de 5% a 33%.

d) Modelo de J. Kim (Kim, 1997)

O modelo proposto por Kim (1997) apresenta o controle adaptativo de uma interseção isolada variável em função do volume veicular. Assim, como nos controladores *fuzzy* comumente apresentados (Pappis e Mamdani, 1977; Favilla *et al.*, 1993), o controlador define a extensão de tempo de verde a partir da inferência sobre uma base de regras *fuzzy*

¹ Kim, S. (1994) *Application of Petri Networks and Fuzzy Logic to Advanced Traffic Management Systems*. Ph.D Thesis, Polytechnic University, USA.

das variáveis de entrada (fila e chegada). No modelo proposto foi inserida uma nova variável de entrada, o volume, que consiste do número de veículos que passam pela interseção. Em função do volume identificado (baixo, médio ou alto), o controlador seleciona uma base de regras específica para estabelecer a inferência *fuzzy* sobre a extensão de tempo de verde. A avaliação do modelo foi realizada através de estudos de simulação que comprovaram a superioridade da proposta frente a outras formas usuais de controle semafórico em termos de capacidade da interseção, grau de saturação e atrasos veiculares.

e) Controlador de Niittymäki e Pursula (2000)

O grupo de estudo da Universidade de Helsinki (HUT) na Finlândia, apresenta um estudo detalhado de controle semafórico *fuzzy* para interseção isolada. Os controladores *fuzzy* desenvolvidos no âmbito da HUT, que têm sido testados com sucesso tanto em estudos de simulação quanto em testes de campo, são estruturados de maneira análoga ao controlador de Mamdani (Niittymäki, 1998; Niittymäki e Pursula, 2000; Niittymäki e Nevala, 2001).

O controlador *fuzzy* definido para a interseção isolada é estruturado como um controlador de Sugeno, com duas variáveis de entrada (fila e chegada) que são relacionadas com a variável de saída (extensão) através de uma base composta por 20 regras (4 para cada intervenção). As variáveis de entrada são definidas como funções triangulares e trapezoidais, e a variável de saída como funções *singleton*. A implementação do antecedente das regras utiliza o operador “*mínimo*” para o conectivo “*e*”. Este operador também é usado na implementação da função de implicação “*então*”, enquanto o operador “*máximo*” é usado para a composição dos resultados das regras para efeito da definição do conjunto *fuzzy* associado à resposta do controlador.

A avaliação do modelo proposto por Niittymäki foi realizada inicialmente, através de simulações utilizando o programa HUTSIM (Kosonen, 1999). As simulações foram realizadas para oito situações de volumes veiculares variando de 100 a 1500 veículos por hora (vph) para ambas as aproximações. Para comparar ao modelo proposto nesse trabalho foi utilizado o controle atuado pelo princípio clássico da extensão (veículo-atuado).

Na operação do controlador simulada no programa HUTSIM, os seguintes procedimentos são adotados:

- a) tempo mínimo de verde igual a 5 segundos para as duas aproximações;
- b) máximo de 5 (cinco) extensões sucessivas de verde para cada aproximação;

c) se uma extensão for calculada como inferior a 2 (dois) segundos, a extensão é concedida mas, ao seu final, nenhuma outra extensão é possível.

Foram realizadas simulações de 2 horas para uma interseção isolada com duas faixas por aproximação, e velocidade média do sistema de 40 *km/h*. Os resultados indicaram que o controle veículo-atuado obteve resultados satisfatórios para as situações com menores volumes de tráfego. Já a aplicação do controle *fuzzy* mostrou-se mais abrangente, sendo adequado para uma grande variação de situações de tráfego. O problema principal observado do algoritmo *fuzzy* desenvolvido foi o comprimento do ciclo máximo atingido pelo controlador. Para aumentar a capacidade deste controlador o autor sugere a utilização de um número maior de extensões dadas para cada fase (Niittymäki, 1998).

f) Modelo de Murat e Gedizlioglu (2005)

Murat e Gedizlioglu (2005) apresentam modelo dinâmico para o controle de interseções isoladas que operam com 3 ou 4 fases. O *Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control* (FLMuSiC) é composto por 2 módulos, que são baseados em lógica *fuzzy*: (i) definição das durações das fases (tempos de verde) e, (ii) definição da seqüência das fases, usando os volumes de tráfego. Para cada um dos módulos é definido um processo de inferência *fuzzy* independente. O controlador é do tipo Mamdani (entradas e saídas do sistema são *fuzzy*), com bases de regras únicas (64 e 37, regras respectivamente) e método de defuzificação COG (centro de gravidade). Os dados do ambiente são obtidos através de dois detectores de tráfego por interseção, o primeiro localizado a 10 m e o segundo a 100 m da linha de retenção.

O modelo desenvolvido foi comparado a dois modelos de controle semafórico atuados (modelo veículo-atuado e SIDRA) e ao modelo finlandês FUSICO, que também utiliza a lógica *fuzzy* para o controle semafórico. A comparação dos modelos foi feita através de simulação de tráfego, e o atraso veicular médio foi utilizado como medida de desempenho. Os resultados de simulação realizadas para diferentes situações e combinações de volumes para as aproximações mostraram resultados animadores da utilização da lógica *fuzzy* para o controle semafórico que abrange não apenas a definição do tempo de verde, mas ainda, a seqüência das fases.

2.2.2 Controle em rede

A maior parte das pesquisas voltadas para o controle semafórico empregando a lógica *fuzzy* é relacionada a condições simplificadas de tráfego, como é o caso das interseções isoladas (item 2.2.1). No entanto, é esperado que uma técnica que apresenta resultados satisfatórios para o controle isolado possa ser adaptada para o controle em rede. Com essa convicção, alguns pesquisadores vêm desenvolvendo sistemas para o controle semafórico utilizando lógica *fuzzy* na operação em rede. Os itens que seguem apresentam alguns dos principais trabalhos relacionados a essa linha de trabalho.

a) Modelo de Nakatsuyama et al. (1984)

O trabalho de Nakatsuyama et al. (1984) traz um estudo preliminar de uma alternativa de controle (testado para duas interseções consecutivas) que pode ser estendida para uma rede arterial. O sistema proposto prevê uma rede arterial em que o primeiro controlador é controlado por um controlador *fuzzy* nos moldes do modelo desenvolvido por Pappis e Mamdani (1977); os demais controladores ao longo da rede são controlados por um sistema de cooperação de dois controladores (a) um controlador *fuzzy* (que determina os tempos semafóricos) e de (b) um controlador de fase *fuzzy* (determinação das defasagens). Estruturalmente, o sistema proposto traz três conjuntos de inferência, um para o controlador *fuzzy*, um para o FPC e outro para a cooperação destes controladores.

O artigo traz comparações do controlador *fuzzy* com o controle atuado do tipo veículo-atuado, do controlador proposto (*Fuzzy Logic Phase Controller*, FPC) com o controle *fuzzy* e defasagem fixa calculada em função do tempo de extensão, e por fim traz um quadro dos atrasos obtidos para a ação cooperada do controlador *fuzzy* e do FPC, e para os controladores operando de modo independente (controlador *fuzzy* e FPC). Os resultados do estudo comprovam as vantagens do uso da cooperação dos dois controladores para a operação do tráfego na rede testada.

b) Modelo de S. Kim (Kim, 1994)

Kim (1994, *apud*, Niittymäki, 1998) estudou inicialmente os controladores para interseção isolada, e continuou seus trabalhos evoluindo para o controle semafórico *fuzzy* em redes abertas. A base de regras *fuzzy* foi incrementada com uma avaliação relacionada à possibilidade de bloqueio das interseções.

O modelo proposto para a operação em rede prevê a utilização de regras adicionais ao modelo desenvolvido para o controle isolado, que buscam prevenir a ocorrência de bloqueio das interseções. Sendo assim, as regras adicionais definidas para sua proposta 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) para W (oeste), somente se este for de conversão à direita.

Assim, o sistema passa por uma avaliação para verificar se as condições de tráfego refletem um bloqueio eminente; se sim, as regras nos moldes supracitados são acionadas, caso contrário, são utilizadas as regras do controlador *fuzzy* para a operação isolada.

Os testes realizados mostraram que a coordenação *fuzzy* aumentou em, aproximadamente, 10% a capacidade do *link* quando comparados com o método convencional de coordenação semafórica de tempo fixo.

c) Sistema de Chiu e Chand (1993)

Uma das principais experiências da utilização de controladores *fuzzy* em rede fechada foi apresentada por Chiu e Chand (1993). O sistema definido prevê o controle de uma pequena rede de interseções através do ajuste de três parâmetros de tempo dos controladores (tempo de ciclo, fase e defasagem) em função das condições de tráfego local e dos parâmetros de tempo semafórico das interseções adjacentes. Cada um dos parâmetros é ajustado de modo independente, ou seja, cada um possui o seu próprio conjunto de regras *fuzzy*. Os autores ressaltam que “embora ajustes independentes destes parâmetros possam culminar em resultados contraditórios, nenhum conflito foi evidenciado nas simulações sob diferentes condições de tráfego”. E, “desde que pequenos ajustes sejam feitos a cada mudança de fase, um ajuste de conflito será mais provável de ser absorvido através de numerosos ajustes sucessivos.”

- *Descrição do sistema:* é proposto um sistema de controle semafórico distribuído, em que os parâmetros semafóricos de uma dada interseção sejam ajustados em função das condições de tráfego locais e dos parâmetros de tempo semafóricos das interseções adjacentes. O tempo semafórico em uma interseção é definido por três parâmetros: tempo de ciclo, fase e defasagem. Foram utilizadas regras *fuzzy* para

ajustar esses três parâmetros baseados apenas em informações locais. O total de modificações nos parâmetros de tempo durante cada ciclo é limitado a uma pequena fração do parâmetro corrente para garantir a transição suave. Os módulos de ajuste do sistema são:

(i) *Ajuste do tempo de ciclo*: o objetivo desse módulo é manter o grau de saturação definido a priori para a operação da rede. Este módulo é composto por 7 regras que relacionam duas variáveis de entrada (maior grau de saturação em qualquer aproximação e graus de saturação das aproximações concorrentes desta) com a variável de saída (ajuste a ser realizado no presente ciclo, expresso como uma fração do tempo de ciclo atual). O ajuste máximo permitido para o tempo de ciclo é 20%.

(ii) *Ajuste da fase*: a fase é ajustada no sentido de manter o mesmo grau de saturação para as aproximações concorrentes. Este módulo é composto por 15 regras que relacionam duas variáveis de entrada (diferença entre o maior grau de saturação obtido para o sentido L-O e maior grau de saturação obtido para o sentido N-S; e o maior grau de saturação para qualquer aproximação) com a variável de saída (ajuste a ser realizado no período de verde corrente do sentido L-O, expresso como uma fração do tempo de ciclo atual).

(iii) *Ajuste da defasagem*: o objetivo é estabelecer a coordenação semafórica das interseções adjacentes para minimizar o número de paradas na direção com maior valor de fluxo de tráfego. O primeiro passo é a identificação da direção dominante, que é feita em função das contagens veiculares de cada aproximação. Com base no tempo de verde previsto para a interseção à montante, o tempo de chegada do pelotão que está deixando esta interseção pode ser calculado. Se o semáforo da interseção seguinte inicia o verde nesse momento, então os veículos irão passar por ela sem parar. O ajuste local requerido para o instante da próxima mudança de fase é determinado com base no tempo de verde a ser alcançado. Regras *fuzzy* são então aplicadas para determinar a fração requerida que será realizada no ciclo atual. Este módulo é composto por 18 regras que relacionam duas variáveis de entrada (diferença entre o volume de tráfego na direção dominante e o volume médio na outra direção; e ajuste de tempo requerido para o total de tempo ajustável) e uma de

saída (ajuste do tempo de verde expresso como uma fração do total de ajuste requerido).

Todas as variáveis definidas nos módulos de controle (variáveis de entrada e de saída) são *fuzzy* com funções dos tipos triangular e trapezoidal.

- *Detalhamento da infra-estrutura:* são previstos detectores de tráfego instalados em todas as faixas de todas as aproximações do sistema. Esses detectores têm a função de contar o número de veículos que passam durante o tempo de verde para cada aproximação.
- *Avaliação do sistema proposto:* foram definidas algumas simplificações para a simulação realizada, tais como, (i) se o veículo não estiver parado, ele está sempre em movimento na velocidade definida como limite da via; (ii) os veículos não mudam de faixa e, (iii) não são permitidos movimentos de conversão. O modelo foi testado para uma rede fechada formada por 6 vias. Como medida de desempenho do modelo desenvolvido, foi utilizado o tempo médio de espera por veículo por segundo gasto na rede. Durante os primeiros 30 minutos de simulação todas as interseções operaram sob o modo de controle por tempo fixo. Do 30º ao 60º minuto, três interseções funcionaram de acordo com as regras *fuzzy* desenvolvidas, enquanto as demais continuaram a operar sob o modo de tempo fixo. Do 60º ao 90º minuto, todas as interseções funcionaram com as regras *fuzzy*. As melhorias observadas no 1º intervalo de avaliação foram insignificantes, enquanto que os melhores resultados foram observados para o 3º intervalo avaliado (60º ao 90º minuto de simulação), quando todas as interseções estavam operando sob o modo adaptativo.

Um aspecto importante a ser observado nesse estudo é que, de acordo com os resultados de simulação apresentados, a efetividade da utilização desse sistema em uma rede muito pequena é limitada se o sistema tiver interseções com ciclos muito diferentes entre si. Para esses casos os autores recomendam a adoção de um ciclo fixo que atenda o sistema.

d) Sistema de Lee e Kwang (1999)

O sistema de controle semafórico *fuzzy* apresentado é denominado como um controle distribuído (cada controlador tem autonomia sobre a sua interseção) e cooperativo (através

de linhas de comunicação cada controlador pode informar aos seus vizinhos o seu “estado”).

- *Descrição do sistema:* os controladores do sistema usam dois tipos de informações: (i) informações dos detectores locais, relativas às condições da sua interseção e, (ii) informações vindas dos detectores vizinhos através das linhas de comunicação. Com base em tais informações as decisões acerca do término de uma fase e sobre a fase que recebe o verde na seqüência, são tomadas.

O processo decisório dos controladores utilizados no modelo proposto é composto de três módulos: (i) o módulo que decide qual será a fase seguinte; (ii) o módulo de observação; e, (iii) o módulo de decisão (Figura 2.2).

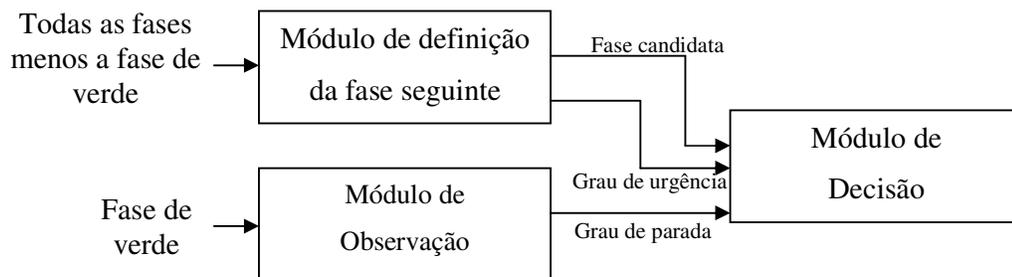


Figura 2.2 Diagrama esquemático do controlador de Lee e Kwang

- Módulo de definição da fase seguinte:* este módulo seleciona um candidato para a próxima fase de verde. Ele observa as condições de tráfego de todas as fases exceto a fase de verde vigente, e dentre elas, seleciona a fase que tem a maior urgência em receber verde. Os dados de entrada para esse módulo são todas as fases exceto a fase de verde, e a saída desse módulo é a fase selecionada e seu “grau de urgência”. A base para a inferência *fuzzy* conta com um conjunto de 36 regras que relacionam 4 variáveis de entrada (*NumCar*, *RedTime*, *SyncTime* e *FNumCar*) com uma saída (*UDT*).
- Módulo de observação:* acompanha as condições de tráfego da fase de verde. De acordo com o resultado ele produz um “grau de parada”, que indica a possibilidade de o controlador parar a fase de verde. A base para a inferência *fuzzy* deste módulo conta com um conjunto de 10 regras que

relacionam 3 variáveis (*OutRate*, *RNumCar* e *FNumCar*) com uma saída (*Stop*).

- (iii) *Módulo de decisão*: esse módulo decide quando parar a fase de verde. A base para a inferência *fuzzy* deste módulo conta com um conjunto de 13 regras que relacionam 3 variáveis (*Candidate*, *Urgency* e *Stop*) com a variável de saída (*Decision*).

Os conjuntos *fuzzy* dos três módulos do sistema são compostos por funções de pertinência dos tipos triangular e trapezoidal.

- *Detalhamento de Infra-estrutura*: devem ser implantados dois detectores de tráfego em cada aproximação (detector inicial e detector final). O detector inicial é localizado sobre a faixa de retenção e o detector final é posicionado a uma distância “*d*” da interseção que é função do comprimento do *link*, conforme apresentado:

Se $link \geq 400 m$, então $d = 150 m$

Se $link < 400 m$, então, $d = (X \times 150)/400$, sendo *X* o comprimento do *link*.

- *Avaliação do sistema proposto*: o desempenho do controlador desenvolvido foi avaliado por meio de simulação. Foram simuladas 18 condições de tráfego com o sistema proposto e com a utilização do método veículo-atuado. Além da utilização de níveis de volume fixos, as simulações foram também realizadas para volumes variáveis ao longo do período avaliado (1 hora). Os resultados obtidos mostraram a superioridade do método proposto sobre o método veículo-atuado em termos de atraso médio. Devido à definição de cada controlador do sistema ser um componente ativo, o modelo proposto pode ser aplicado para qualquer configuração de rede, independentemente do número de interseções ou de posicionamento relativo das interseções.

2.3. ESTUDOS SOBRE ELEMENTOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O controle semafórico *fuzzy* vem sendo amplamente investigado em função dos bons resultados obtidos em pesquisas e testes em campo. No entanto, os controladores apresentados na literatura seguem praticamente a mesma estrutura, ou seja, poucos elementos do controle *fuzzy* são explorados, especialmente, por desconhecimento dos impactos que tais elementos causariam na resposta de controle. Investigações acerca desses

aspectos devem ser realizadas e divulgadas, para que novas estruturas de controladores *fuzzy* possam ser idealizadas segundo uma orientação dos impactos das alterações dos elementos do controlador, e não apenas usando o método de tentativa e erro, geralmente empregado na estruturação de sistemas que utilizam técnicas de IA, quando não há uma exploração adequada dos seus elementos. Assim, tais estudos devem facilitar as buscas por estruturas de controladores *fuzzy* adequadas para cada situação de controle a que será submetido, ou seja, otimiza a utilização da ferramenta.

2.3.1 Elementos dos controladores *fuzzy*

Conforme pode ser observado na Figura 2.1, o controlador *fuzzy* é uma estrutura composta de três partes principais: (a) interface de entrada, (b) módulo de processamento e (c) interface de saída.

A interface de entrada é responsável pela fuzificação dos valores numéricos do sistema controlado. Os dados oriundos dos detectores de tráfego posicionados nas aproximações tem seus “valores” transformados em um grau de pertinência associado a cada conjunto *fuzzy* das variáveis lingüísticas consideradas. Já a interface de saída é responsável pela defuzificação, procedimento que traduz o vetor de pertinência em um valor numérico que é a resposta do controlador ao sistema controlado (Pedrycz, 1994).

O módulo de processamento determina a relação entre as variáveis de entrada e de saída do sistema ou, mais especificamente, entre suas representações lingüísticas internas. Esse módulo é composto por:

- *Base de conhecimento*: conjunto de instruções *fuzzy* que, ao serem processadas, produzem uma solução aproximada para um determinado problema. As instruções são expressas por regras *fuzzy* do tipo “*se-então*”.
- *Unidade lógica de tomada de decisão*: o comportamento do controlador é resultado da “agregação” das regras *fuzzy* da base de conhecimento.

A Tabela 2.1 apresenta os elementos básicos a serem considerados nos módulos de um controlador *fuzzy*, juntamente com as opções para implementação de cada uma delas, disponíveis no *software* MATLAB®.

Sintetizando, cada regra é construída a partir da definição de operadores para o processamento do antecedente da regra e da função de implicação que irá definir o seu

consequente. A ação do controlador *fuzzy* é definida pela agregação das n regras R_i que compõem o algoritmo, mediante o uso dos conectivos “*and*” e/ou “*or*”, os quais podem ser implementados por diferentes operadores. Esta agregação resulta no conjunto *fuzzy* C , que define a saída do controlador. A saída efetiva do controlador é então obtida por meio de um processo de defuzificação aplicado ao conjunto C .

Tabela 2.1 Elementos básicos dos Controladores *Fuzzy*

Elementos		Opções
Operadores dos conectivos	<i>AND</i>	<i>Min</i> (mínimo) <i>Prod</i> (produto) <i>Custom</i> (operação personalizada)
	<i>OR</i>	<i>Max</i> (máximo) <i>Probor**</i> <i>Custom</i> (operação personalizada)
Funções de Implicação		<i>Min</i> (mínimo) <i>Prod</i> (produto) <i>Custom</i> (operação personalizada)
Funções de Agregação		<i>Max</i> (máximo) <i>Sum</i> (soma) <i>Probor**</i> <i>Custom</i> (operação personalizada)
Defuzificação		<i>Centroid</i> (centróide da área) <i>Bisector</i> (bissetor da área) <i>Mom</i> (médio do máximo) <i>Lom</i> (maior do máximo) <i>Som</i> (menor do máximo) <i>Custom</i> (operação personalizada)
Forma das funções de pertinência		<i>Triangular</i> <i>Trapezoidal</i> <i>Em forma de Z</i> <i>Em forma de S</i> <i>Em forma de π</i> <i>Gaussiana</i> <i>Em forma de seno</i> <i>Sigmoidal</i> <i>Combinação de duas Gaussianas</i> <i>Produto de duas Sigmoidais</i>

* Elementos disponibilizados no *software* MATLAB®.

***Probor*: $y = \text{probor}(x)$ retorna o “ou” probabilístico das colunas de x . Se “ x ” tem duas colunas como $x = [a; b]$, então $y = a + b - a.b$. Se “ x ” tem apenas uma coluna, então $y = x$.

Embora as diferentes possibilidades para a implementação dos conectores das regras, das funções de implicação e do processo de defuzificação sejam amplamente discutidas na literatura (ver, por exemplo, Lee 1990a e 1990b), os estudos acerca dos impactos na

utilização de algumas das possibilidades para os elementos listados foram objeto de pesquisas recentes (Jacques *et al.*, 2002b, 2002c, 2003; Vaz, 2006).

2.3.2 Formas de implementação de conectores *fuzzy*

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 da regra de operação mínima *fuzzy* (regra de Mamdani) é frequentemente utilizada. Porém, as razões para estas escolhas não são indicadas nos trabalhos onde esses controladores são apresentados.

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 dos controladores semafóricos *fuzzy* deve ser precedida de uma avaliação do impacto das alternativas disponíveis, ou seja, esta escolha não deve ser feita *a priori*, e devem ser considerados os objetivos desejados para o controle do tráfego.

2.3.3 Métodos de defuzificação

Jacques *et al.* (2002c) apresenta uma avaliação do impacto de diferentes métodos de defuzificação através do desempenho de controladores semafóricos *fuzzy* obtido por meio de simulações realizadas no HUTSIM. As simulações foram realizadas para uma interseção isolada de sentido único de tráfego e sem movimentos de conversão. Nas vias analisadas é permitido apenas o trânsito de veículos de passeio. Foram considerados diferentes volumes de tráfego para subsidiar as análises propostas para o trabalho.

Para o estudo considerado, a implementação da base de regras dos controladores testados foi feita com os conectores usuais (união e interseção). As alterações realizadas na estrutura dos controladores foram relacionadas unicamente ao método de defuzificação utilizado, tendo sido avaliados três métodos: método do centro de gravidade (COG), média dos valores máximos (MOM) e mínimo dos máximos (SOM).

As análises realizadas demonstram que as diferenças observadas nas ações de controle e no desempenho de tráfego, para diferentes métodos de defuzzificação, são estatisticamente significativas para o nível de confiança de 95%. Mostram, ainda, que o volume de tráfego considerado afeta significativamente o efeito de cada método.

É possível observar que uma mesma base de conhecimento pode promover mudanças contínuas na ação de controle para um método de defuzzificação e superfícies de resposta de controle muito irregulares para outros. Sendo assim, a escolha do método de defuzzificação não deve ser feita *a priori*. Tal escolha deve considerar os demais elementos do controlador e os níveis de volume de tráfego na interseção a ser controlada. Vale ressaltar que a realização de simulações é altamente recomendável na fase de concepção dos controladores, pois assim é possível avaliar as conseqüências de cada opção de método de defuzzificação.

2.3.4 Funções de pertinência

O estudo desenvolvido por Vaz (2006) acerca da avaliação do impacto da utilização de diferentes formatos das funções de pertinência para os controladores semafóricos *fuzzy* apresentou resultados relevantes relacionados a esses controladores. Este trabalho sucedeu o de Santos (2003), em que foi verificado que a utilização de diferentes partições dos universos de discurso das variáveis de entrada do controlador afeta significativamente a resposta do controlador e o desempenho do tráfego controlado. Nesse caso, a forma das funções de pertinência não foi alterada.

A avaliação proposta por Vaz (2006) foi realizada através de um estudo controlado de simulação da operação do tráfego em uma interseção isolada, sob três níveis de volume de tráfego. Para a análise dos resultados foram adotadas como medidas de desempenho do tráfego o atraso médio por ciclo e a porcentagem de paradas veiculares. A avaliação da resposta do controlador foi realizada através da duração do tempo de verde de cada fase e do tempo de ciclo.

Os estudos realizados acerca das funções de pertinência nos controladores semafóricos *fuzzy* mostraram que a adoção de diferentes formas para essas funções afetam de modo significativo na resposta do controlador. Ou seja, os resultados sugerem que é adequado definir um controlador semafórico ajustado às necessidades do controle de tráfego em cada interseção a partir da seleção de formas alternativas para as funções de pertinência associadas aos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e saída do controlador.

No entanto, essa definição deve ser feita a partir de estudos envolvendo simulações para a avaliação da melhor situação para cada caso particular. Ressalta-se, portanto, a necessidade de desenvolvimento de um método que, de forma sistemática e ágil, selecione a forma mais adequada das funções de pertinência para cada situação de controle (Vaz *et al.*, 2005).

2.4. TÓPICOS CONCLUSIVOS

Através do estudo teórico realizado é possível observar que alguns elementos utilizados na concepção dos controladores semafóricos *fuzzy*, tais como o método de defuzificação, os conectivos e a forma das funções de pertinência, são em geral os mesmos para a maior parte dos trabalhos apresentados. Por exemplo, para os controladores concebidos sob o modelo de Mamdani, o método de defuzificação utilizado é o centro de gravidade (Favilla *et al.*, 1993; Chiu e Chand, 1993; Kim, 1997; Murat e Gedizlioglu, 2005) e para os controladores concebidos sob o modelo de Sugeno as variáveis de saída são do tipo *singleton* (Kim, 1994 e Niittymäki, 1998). Observa-se ainda que as variáveis de todos os modelos revisados são compostas por funções de pertinência do tipo triangular e/ou trapezoidal. O pequeno número de investigações acerca dos impactos desses elementos na resposta do controle semafórico (Jacques *et al.*, 2002b, 2002c, 2003; Vaz *et al.*, 2005; Vaz, 2006), somado ao grande número de alternativas para cada elemento do controlador, faz com que os pesquisadores busquem melhorar os controladores *fuzzy* utilizando, ao máximo, os elementos comumente empregados na literatura.

Esta revisão mostrou ainda, que há um grande número de pesquisas voltadas para a busca de alternativas para a utilização de controladores semafóricos *fuzzy* na operação em rede. Os controladores semafóricos *fuzzy* que operam de modo isolado utilizam, em sua maioria, o princípio da extensão de tempo de verde; assim, a saída do controlador *fuzzy* é a “*extensão*” a ser dada para a aproximação que está sendo atendida. Esses controladores utilizam normalmente, as variáveis “*fila*” e “*chegada*” obtidas do sistema para alimentar seu módulo de tomada de decisão. Já os sistemas revisados de controle semafórico em rede utilizando a lógica *fuzzy* não apresentam o mesmo processo. Em geral, são definidos módulos *fuzzy* específicos para a otimização dos elementos da operação semafórica em rede, tais como fase, ciclo e defasagem, como, por exemplo, os modelos de Chiu e Chand (1993) e Lee e Kwang (1999) (Quadro 2.1).

O modelo de Chiu e Chand (1993) não utiliza nenhuma variável de entrada do sistema que reflita a quantidade de veículos parados em uma aproximação, sendo assim, o sistema

controlado pode estar vulnerável a travamentos de *links*. O autor apresenta uma ressalva acerca da fragilidade do modelo quando utilizado para pequenas redes com interseções que operam com ciclos muito diferentes dentro do sistema. Para essa situação, recomenda a utilização de um ciclo fixo para o sistema para obter um melhor desempenho global. Vale destacar ainda que, pelo ajuste dos parâmetros do sistema proposto ser feito de modo totalmente independente, podem ocorrer parâmetros ajustados em sentidos opostos para um dado objetivo do controle. O autor reconheceu esse risco e declarou no documento que avaliou tal aspecto nos resultados de simulação realizados e que não foi detectado nenhum tipo de conflito dessa natureza.

O sistema proposto por Lee e Kwang (1999) não tem como variável de saída valores para alterar o tempo de verde, mas uma informação que permite interromper ou não a fase de uma dada aproximação. Nessa estrutura não é possível estender os tempos de uma aproximação que está sendo solicitada, no entanto, é possível não interromper a aproximação concorrente. É importante avaliar cuidadosamente esse modo de atuação para identificar a existência, ou não, de limitação na interpretação do sistema controlado.

O critério de controle da descarga de veículos sobre um *link* carregado apresentado por Kim (1994) é outro aspecto relevante para o estabelecimento do controle em rede. O método proposto utiliza apenas esse critério para o estabelecimento da “*coordenação*” das interseções adjacentes. Assim, a utilização desse conceito associado a outros elementos que avaliem mais profundamente o ambiente controlado, pode resultar em um método de controle mais eficiente.

Os estudos revisados também não apresentaram indicações sobre as condições limites de fluxo de tráfego e de espaçamento entre as interseções a partir das quais o controle cooperado entre os controladores *fuzzy* se faz necessário. No caso do controle arterial por tempo fixo, DENATRAN (1984) ressalta que os semáforos podem estar distanciados de 50 a 600 metros entre si, sendo que a coordenação dos semáforos faz-se necessária à medida que a distância entre eles diminui. Roess *et al.* (2004) recomenda a operação coordenada para interseções espaçadas por menos de 300 metros.

Quadro 2.1 Quadro resumo de estudos relacionados ao desenvolvimento de Controladores Semafóricos *Fuzzy* para operação isolada e em rede

Autor	Descrição
1 Pappis e Mamdani (1977)	<u>Controle isolado</u> : o controlador de Pappis e Mamdani foi o trabalho pioneiro na utilização da lógica <i>fuzzy</i> para o controle semafórico. Este controlador é baseado no princípio clássico da extensão do tempo de verde, sendo que as extensões dadas são obtidas de inferências <i>fuzzy</i> subsidiadas por dados oriundos de observações das aproximações da interseção (número de veículos parados em fila e número de veículos que passam pela aproximação que recebe a indicação verde). A avaliação do modelo proposto foi realizada a partir de resultados de simulação de tráfego para 16 situações distintas para a operação isolada de uma interseção. Os resultados mostraram reduções dos atrasos obtidos com CSF em até 20% quando comparados com o controle veículo-atuado.
2 Nakatsuyama <i>et al.</i> (1984)	<u>Controle em rede</u> : propõem a coordenação de 2 interseções ao longo de uma via arterial, utilizando uma estrutura cooperada de controladores composta de (i) controlador baseado na proposta de Pappis e Mamdani e (ii) controlador de fase <i>fuzzy</i> . Os estudos de simulação comprovaram as vantagens em termos de atrasos veiculares para a operação cooperada quando comparada à operação utilizando apenas um dos tipos de controladores <i>fuzzy</i> apresentados. O controlador traz resultados mais satisfatórios para condições de grande variação nos volumes veiculares (horários entre pico).
3 Favilla <i>et al.</i> (1993)	<u>Controle isolado</u> : propõe um sistema denominado Controle de Tráfego <i>Fuzzy</i> (FTC) composto de 3 módulos: (i) controlador <i>fuzzy</i> que define as extensões de tempo de verde, (ii) máquina de estado, que controla a seqüência das fases e, (iii) módulo de adaptação dos conjuntos <i>fuzzy</i> (método estatístico e método <i>fuzzy</i>). A avaliação do sistema proposto consistiu de simulações de tráfego realizadas para uma interseção da cidade de São Paulo sob o controle proposto pelos autores e para o modelo proposto por Pappis e Mamdani. Os resultados comprovaram (a) as vantagens do modelo proposto sobre o modelo de Pappis e Mamdani, e (b) que o esquema de adaptação <i>fuzzy</i> apresentou os melhores resultados em termos de atraso médio para todos os casos testados. Tais resultados foram tidos como motivadores para novos estudos voltados ao desenvolvimento de sistemas adaptativos mais robustos.

Continuação do Quadro 2.1

Autor	Descrição
4 Chiu e Chang (1993)	<p><u>Controle em rede</u>: o sistema proposto prevê o controle em uma pequena rede fechada através do ajuste de 3 parâmetros de tempo (ciclo, fase e defasagem) em função das condições de tráfego e dos tempos semafóricos das interseções adjacentes. Para o ajuste de cada parâmetro há um conjunto de regras específico, que compõe um sistema de controle do tipo distribuído. Os resultados dos testes realizados por meio de simulação comprovaram os benefícios da utilização do controle adaptativo em toda a rede, e ainda, mostram que a utilização deste sistema em estruturas de redes muito pequenas fica limitada para condições de tráfego muito diferenciadas que resultem em tempos de ciclo muito diferentes ao longo da rede.</p>
5 S. Kim (1994)	<p><u>Controle isolado</u>: o algoritmo <i>fuzzy</i> proposto é baseado no controlador de Pappis e Mamdani (1977). O controlador é do tipo Sugeno e é apto a controlar interseções com movimentos de conversão e até 4 fases semafóricas (2 fases exclusivas para conversão). Assim como o controlador de Pappis e Mamdani, o modelo proposto permite até 5 extensões do tempo de verde. O valor de cada extensão dada varia no intervalo de 0 a 10 segundos. Resultados de simulação do método proposto foram comparados ao controle por tempo fixo, sobre o qual o modelo proposto apresentou resultados de 5% a 33% melhores.</p> <p><u>Controle em rede</u>: a operação em rede é realizada através da adição de regras a serem aplicadas em situações de bloqueio iminente de interseção. As regras visam impedir a entrada de veículos nos links que estão próximos de uma situação de saturação. Nos casos em que não é detectada nenhuma condição iminente de bloqueio o controlador atua com as regras definidas para a operação isolada.</p>
6 J. Kim (1997)	<p><u>Controle isolado</u>: o modelo de Kim foi estruturado nos moldes do controlador proposto por Pappis e Mamdani, porém foi adicionada uma variável de entrada, “volume veicular”. Através dessa variável o sistema seleciona uma base de regras específica. O resultado da inferência <i>fuzzy</i> é também a extensão do tempo de verde. Resultados de simulação comprovaram a superioridade do modelo proposto sobre outros modelos, tal como o Pappis e Mamdani, em termos de capacidade da interseção, atraso veicular médio e grau de saturação.</p>

Continuação do Quadro 2.1

Autor	Descrição
7 Lee e Kwang (1999)	<p><u>Controle em rede</u>: O sistema proposto é composto de 3 módulos gerenciados por algoritmos <i>fuzzy</i> que operam de modo cooperativo. A avaliação do sistema proposto foi feita por meio de simulação para 18 condições de tráfego e duas formas de volume veicular (fixo e variável ao longo da hora de simulação). Os resultados do sistema proposto foram comparados a resultados obtidos pelo controle do tipo veículo-atuado, através do atraso médio, em que a superioridade do novo modelo foi comprovada. Em função de cada controlador do sistema ser um componente ativo (autônomo), o modelo proposto pode ser aplicado para qualquer configuração de rede, independentemente do número de interseções ou de posicionamento relativo das interseções.</p>
8 Niittymäki e Pursula (2000)	<p><u>Controle isolado</u>: o controlador desenvolvido na Finlândia (FUSICO) foi concebido nos moldes do trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani, no entanto, é estruturado com apenas duas variáveis de entrada (fila e chegadas veiculares) e uma variável de saída (extensão de tempo de verde). A avaliação do modelo proposto foi realizada por meio de simulação de tráfego através do simulador HUTSIM. Diferentes situações de tráfego foram simuladas com o uso do controlador proposto e do controlador veículo-atuado, sendo que controlador <i>fuzzy</i> apresentou vantagens sobre o controle veículo-atuado no aspecto de robustez diante das diferentes condições de tráfego testadas. A principal crítica ao sistema foi relativa ao ciclo máximo alcançado pelo controlador. Nessa ocasião o autor sugeriu o aumento do número máximo de extensões dadas a cada fase (originalmente fixada em 5) para buscar um aumento da capacidade do controlador.</p>
9 Murat e Gedizlioglu (2005)	<p><u>Controle isolado</u>: os autores apresentam um modelo dinâmico para o controle de interseções isoladas que operam com 3 ou 4 fases. O <i>Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control</i> (FLMuSiC) é composto por 2 módulos, que são baseados em lógica <i>fuzzy</i>: (i) definição das durações das fases (tempos de verde) e, (ii) definição da seqüência das fases, usando os volumes de tráfego. Cada módulo possui seu processo de inferência <i>fuzzy</i>. A avaliação do modelo proposto foi realizada através da comparação de resultados de simulação (atraso veicular médio) do modelo proposto com três alternativas: (a) modelo veículo-atuado, (b) SIDRA e (c) modelo finlandês FUSICO. Os testes realizados trouxeram resultados animadores da utilização da lógica <i>fuzzy</i> para o controle semafórico que abrange não apenas a definição do tempo de verde, mas ainda, a seqüência das fases.</p>

3. ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O presente capítulo traz os trabalhos relativos ao Grupo de Estudos 1 definido na metodologia. Esta etapa é composta de três estudos complementares aos disponíveis na literatura sobre as características dos controladores semafóricos *fuzzy*. Tais investigações são relevantes no sentido de verificar os impactos que alguns elementos destes controladores causam na resposta do controlador e no controle do tráfego. Os efeitos decorrentes de diferentes padrões de sobreposição dos conjuntos *fuzzy*, o tipo de controlador *fuzzy* definido (se do tipo Mamdani ou Sugeno) e a estrutura da base de regras do bloco de inferência (se única ou particionada) foram os elementos investigados neste estudo. As análises relativas às explorações propostas são realizadas sobre resultados de simulação do controle do tráfego.

3.1 ESTUDO DO IMPACTO DE DIFERENTES SOBREPOSIÇÕES DOS CONJUNTOS FUZZY NOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS

Há disponível na literatura um grande número de estudos realizados empregando conjuntamente lógica *fuzzy* e redes neurais para o controle semafórico, por vezes empregando ainda outras técnicas de Inteligência Artificial como algoritmos genéticos e agentes inteligentes (De Re, 1995; Bingham, 1998; Sayers e Anderson, 1999; Wiering, 2000; Oliveira *et al.*, 2005; Oliveira *et al.*, 2006; Campos, 2006; Srinivasan *et al.*, 2006; Grégoire *et al.*, 2007). A grande maioria desses estudos é realizada por pesquisadores da área computacional que buscam no controle semafórico um exemplo de aplicação para comprovar a aplicabilidade prática ou eficiência da ferramenta ou metodologia em desenvolvimento. O principal problema encontrado nesses estudos para a área de engenharia de tráfego é a ausência de exploração dos resultados sob o foco da eficiência do controle semafórico realizados pelos métodos propostos.

Dos estudos disponíveis apenas dois utilizam a estrutura *neuro-fuzzy* para realizar ajustes nos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* (Bingham, 1998 e De Re, 1995). Destes apenas o trabalho de Bingham (1998) apresenta um detalhamento dos conjuntos *fuzzy* após os ajustes realizados pelo sistema *neuro-fuzzy*, o que permite a comparação dos conjuntos iniciais e dos conjuntos finais em termos de completude e coerência dos ajustes realizados frente às definições lingüísticas do controlador. Tal análise é de extrema importância para

o pesquisador da área de tráfego, uma vez que avaliar a coerência dos conjuntos *fuzzy* com o contexto de controle é fundamental para o sucesso do controle em campo.

A pesquisa desenvolvida na Finlândia por Bingham (1998), que propunha o desenvolvimento de um controlador semafórico *neuro-fuzzy*, não apresentou resultados promissores conforme as conclusões da autora. Além da verificação da impossibilidade de utilização de um algoritmo de treinamento por reforço em tempo real, devido ao tempo demandado para o treinamento, observou-se ainda que os formatos finais das funções de pertinência não eram adequados aos conceitos lingüísticos que as originaram. Observou-se ainda que a sobreposição das funções de pertinência, mantidas no limite recomendável para os conjuntos iniciais, atingiram níveis inadequados após o treinamento chegando a resultar em intervalos com valores descobertos no universo de discurso.

Outro trabalho nesse escopo, de De Ré (1995) desenvolvido no Brasil, teve como objetivo principal avaliar a capacidade de aprendizagem do algoritmo proposto por Nauck *et al.* (1995) e, para tanto, o controle semafórico foi utilizado para o teste em questão. A estrutura *neuro-fuzzy* utilizada neste estudo, NEFCON, utiliza algoritmo de aprendizagem por reforço. Os resultados obtidos mostraram a viabilidade de utilização do sistema para o controle semafórico adaptativo realizado para uma interseção isolada e com nível de volume constante (1.100 vph). É importante ressaltar que não foram apresentados os conjuntos *fuzzy* finais obtidos do treinamento, inviabilizando as análises acerca da efetiva adequação desta estrutura para o controle do tráfego.

A avaliação da coerência dos conjuntos *fuzzy* com a estrutura de regras e o contexto de controle é de extrema importância devido à natureza do controle semafórico. As respostas do controlador semafórico devem ser coerentes ao usuário para garantir a confiabilidade do sistema de controle, para isso a superfície de resposta deste controlador deve ser suave, o que garante respostas similares para situações de tráfego similares. Os ajustes realizados nos parâmetros dos conjuntos *fuzzy* não devem comprometer a continuidade da superfície de resposta do controlador uma vez que sistemas de controle contínuo com características estocásticas devem ser resguardados quanto à estabilidade.

É importante ressaltar que testes laboratoriais podem apresentar resultados globais satisfatórios em termos de medidas de desempenho com simulações realizadas a partir de conjuntos *fuzzy* irregulares e sem coerência. Tais resultados não podem ser tidos como

referência para a adequação deste controlador para aplicações em campo, pelos motivos supracitados que atentam para os impactos que superfícies de controle irregulares podem causar em operações em campo.

3.1.1 Definição dos elementos de simulação

A ocorrência de trechos descobertos do universo de discurso dos conjuntos *fuzzy* e a irregularidade das funções de pertinência, observadas após os ajustes realizados pelo sistema *neuro-fuzzy*, foram tidos como fatores relevantes no insucesso da utilização desta ferramenta no estudo desenvolvido por Bingham (1998).

Com o objetivo de ampliar o entendimento e percepção em relação à influência destes fatores nos resultados do controle semafórico *fuzzy*, foi realizada uma investigação com oito (08) alternativas de controladores (denominados C113A a C113H) (ver Tabela 3.1) que foram comparadas ao modelo de controlador *fuzzy* padrão (denominado C113) (Figura 3.1) já utilizado em estudos anteriores (Jacques *et al.*, 2003; Andrade, 2004 e Vaz *et al.*, 2005). Os conjuntos *fuzzy* de entrada do controlador padrão foram modificados manualmente buscando combinações diferentes do utilizado convencionalmente (grau de sobreposição entre 25% e 75%, simetria das funções e uniformidade na distribuição das variáveis no recobrimento do universo de discurso), e que se assemelhassem às modificações observadas no ajuste *neuro-fuzzy* obtidos no trabalho de Bingham (1998).

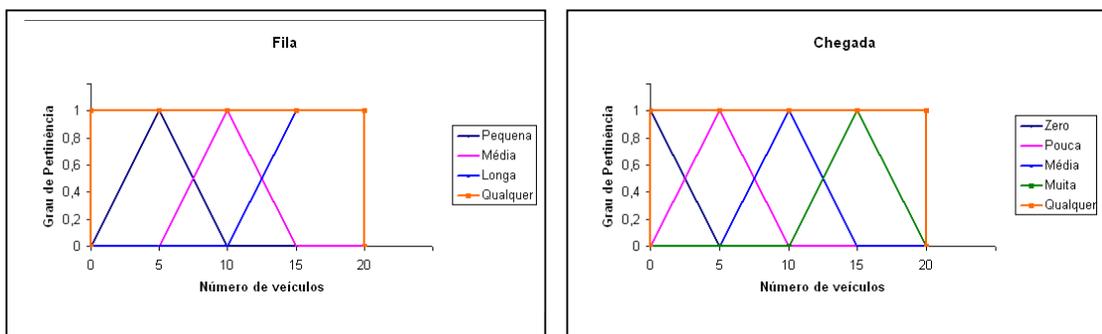


Figura 3.1 Conjuntos *fuzzy* de Fila e Chegada para o controlador semafórico *fuzzy* “padrão”

O conjunto *fuzzy* de saída (extensão) e a base de regras do controlador *fuzzy* padrão foram mantidos inalterados. Esses dados estão disponíveis em Andrade (2004).

A análise do impacto das modificações nos limites dos conjuntos *fuzzy* deve ser realizada sob dois aspectos: influência na resposta de controle e no desempenho do tráfego. A primeira análise é realizada através da avaliação das superfícies de controle geradas para cada controlador, e a segunda, através de medidas de desempenho geradas por simulações realizadas no HUTSIM para uma interseção isolada e volume veicular médio (1200 e 600 veículos por hora, para as duas aproximações da interseção).

Tabela 3.1 Limites dos conjuntos *fuzzy* dos casos estudados

Fila					
Conjunto <i>Fuzzy</i>		Pequena	Média	Longa	Qualquer
Limites	C113 (padrão)	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113A	[0 3 6]	[6 9 12]	[12 15 20 20]	[0 0 0 0]
	C113B	[0 3 6]	[6 9 12]	[12 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113C	[0 2,5 5]	[6 9 12]	[13 15 20 20]	[0 0 0 0]
	C113D	[0 2,5 5]	[6 9 12]	[13 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113E	[0 2,5 5]	[6 9 13]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113F	[0 1 4]	[5 9 11]	[10 15 17 20]	[0 0 20 20]
	C113G	[0 1 4]	[5 9 11]	[10 15 17 20]	[0 0 20 20]
	C113H	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]

Chegada						
Conjunto <i>fuzzy</i>		Zero	Pouca	Média	Muita	Qualquer
Limites	C113 (padrão)	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113A	[0 0 3]	[3 6 9]	[9 12 15]	[15 17 20 20]	[0 0 0 0]
	C113B	[0 0 3]	[3 6 9]	[9 12 15]	[15 17 20 20]	[0 0 20 20]
	C113C	[0 0 2]	[3 6 9]	[10 12 14]	[15 17 20 20]	[0 0 0 0]
	C113D	[0 0 2]	[3 6 9]	[10 12 14]	[15 17 20 20]	[0 0 20 20]
	C113E	[0 0 5]	[0 4 8]	[10 12 15]	[12 17 20 20]	[0 0 20 20]
	C113F	[0 0 1]	[0 2 8]	[2 12 15]	[14 17 20 20]	[0 0 20 20]
	C113G	[0 0 5]	[0 5 10]	[5 10 15]	[10 15 20 20]	[0 0 20 20]
	C113H	[0 0 5]	[0 4 8]	[10 12 15]	[12 17 20 20]	[0 0 20 20]

3.1.2 Influência na resposta de controle

A resposta do controlador é avaliada de acordo com a superfície de controle (Figuras 3.3 e 3.4) obtida dos resultados das inferências *fuzzy*. As possíveis respostas de controle

compõem uma tabela com limite de 20 veículos, tanto para “*chegada*” (veículos que chegam à aproximação que recebe verde), como para “*fila*” (veículos parados na aproximação que recebe vermelho), que representa, portanto, o limite do universo de discurso definido para este controlador (ver Tabelas no Apêndice A).

Os casos C113A e C113B e, C113C e C113D diferem entre si apenas pela inserção da função de pertinência “*qualquer*” das variáveis fila e chegada. A ausência da função de pertinência não trouxe diferença significativa nas superfícies de controle geradas. Sendo assim, os demais casos foram estudados com a função “*qualquer*”.

Os ajustes realizados nos limites das funções de pertinência trouxeram modificações significativas na superfície de controle e, por conseguinte, na resposta do controlador. Em geral, a superfície torna-se irregular, com picos e vales que representam mudanças bruscas na resposta (extensão de verde) para pequenas modificações nas entradas (fila e chegada). Este padrão de mudança na resposta dos controladores implantados em campo pode causar instabilidade no sistema, tornando o sistema de controle ineficiente e inseguro. A Figura 3.2 apresenta os conjuntos *fuzzy* do caso C113C, e as Figuras 3.3 e 3.4 apresentam as superfícies de controle dos casos C113 (padrão) e C113C.

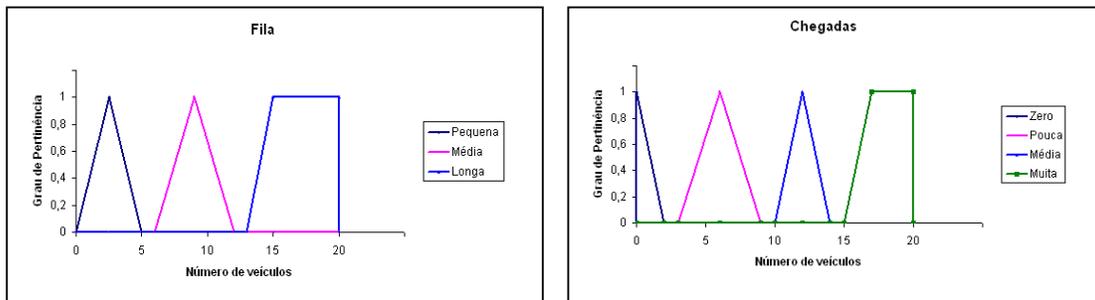


Figura 3.2 Conjuntos *fuzzy* de Fila e Chegada para o caso C113C

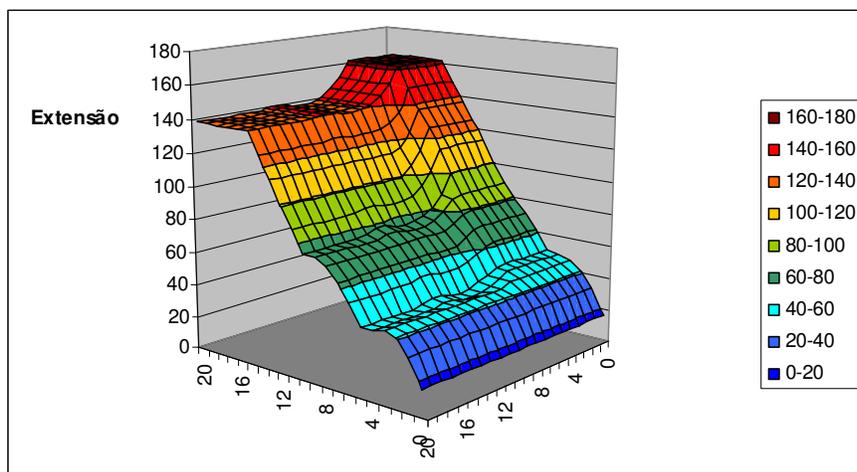


Figura 3.3 Superfície de controle do caso C113 ou padrão

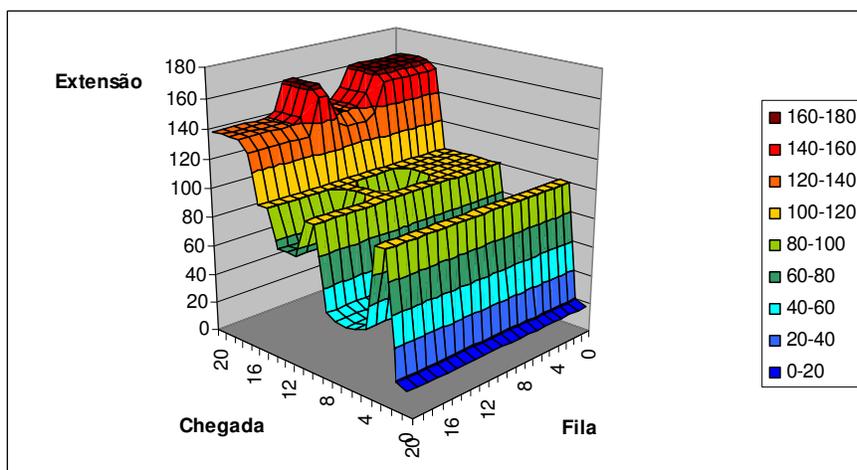


Figura 3.4 Superfície de controle do caso C113C

Os conjuntos que foram ajustados compondo suas funções de forma justaposta (casos C113A e C113B) e permitindo aberturas no recobrimento do universo de discurso (casos C113C e C113D), tendo sido mantida a simetria das funções para todos os casos, apresentaram superfícies de controles similares. Sendo assim, para o controlador semafórico *fuzzy* com as regras utilizadas, observa-se que a sobreposição das funções de pertinência influencia a resposta do controlador de forma significativa, tanto que a resposta do controlador de funções justapostas é semelhante à resposta do controlador com falhas no recobrimento do universo de discurso.

É importante observar que os pontos de pertinência zero nos casos estudados (C113A, B, C e D) apresentam resposta fixa em 10 segundos. Por exemplo, se o número de chegadas

mantém-se fixo em 9 veículos, para qualquer valor de fila a extensão é 10 segundos (Figura 3.5). Isso ocorre pelo fato de que todas as regras do banco consideram a variável chegada; sendo assim, se não há fuzificação de chegada, não há disparo de regra e a defuzificação é dada sempre pelo valor correspondente ao ponto médio do universo de discurso, que para o caso estudado resulta sempre em 10. A variável fila com pertinência zero pode resultar em diferentes valores de extensão de tempo de verde, pois a existência de regras que não a considera (regra 11, 12 e 13) permite que haja fuzificação para tais situações (Figura 3.5).

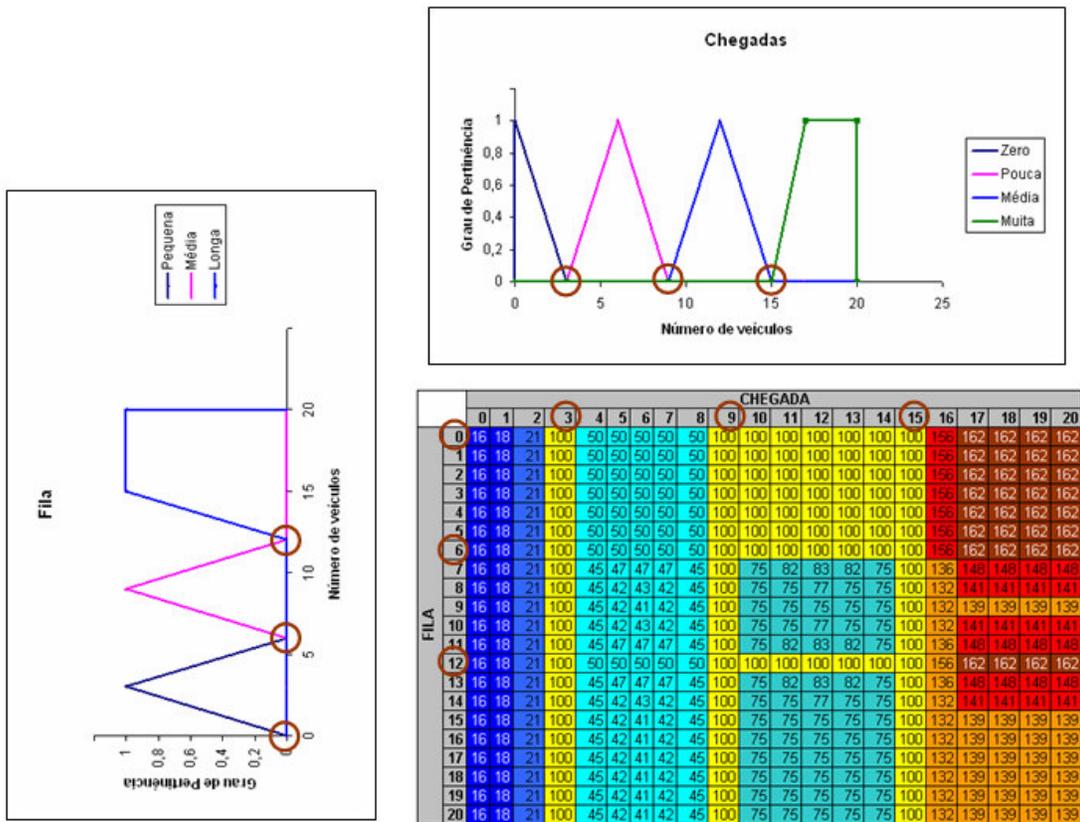
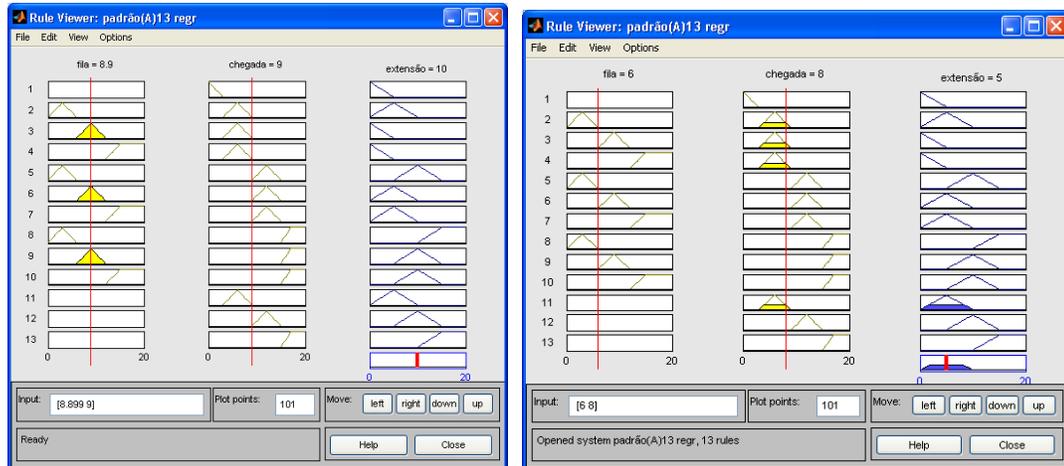


Figura 3.5 Composição da tabela de extensões e a representação dos respectivos conjuntos de Fila e Chegada

A ocorrência de trechos descobertos no universo de discurso é prejudicial ao controle devido às possíveis situações de entrada sem fuzificação (Figura 3.6). Ainda que a base de conhecimento contenha regras que ignorem algumas das variáveis permitindo o disparo destas quando a variável ignorada está sob nulidade, a resposta do controlador não apresentará a sensibilidade esperada (Figura 3.5). Shaw e Simões (2001) ressaltam que as funções de pertinência devem ser completas, ou seja, o conjunto de funções de pertinência

associado a uma variável específica deve cobrir todo o universo de discurso desta variável. Os autores alertam ainda sobre os limites recomendáveis de sobreposição (de 25% a 75%) das funções de pertinência e sua relevância na precisão do controle estabelecido.

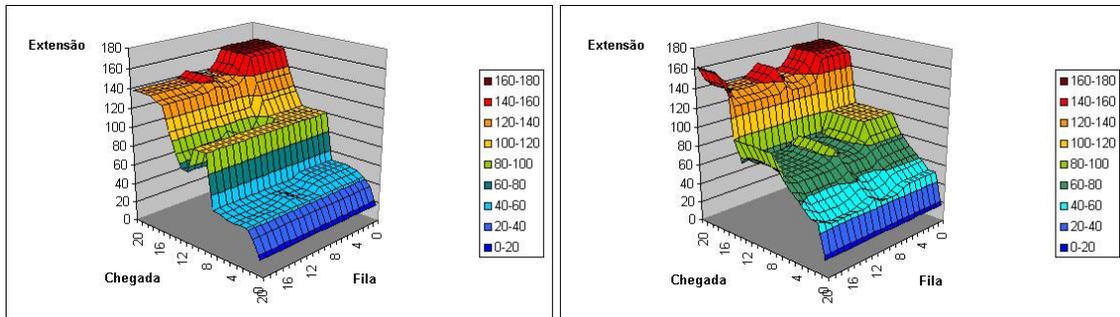


(a) variável “*Chegada*” com pertinência nula (b) variável “*Fila*” com pertinência nula

Figura 3.6 Nulidade de variáveis e sua fuzyficação

Ao ajustar os limites das funções de pertinência de forma desordenada em relação à manutenção da simetria e recobrimento do universo de discurso, obtiveram-se resultados variados. Inicialmente foram observados dois casos em que as funções triangulares não foram simétricas e a sobreposição de funções vizinhas ocorreu em variados graus, inclusive, sem superposição (C113E e C113F).

Como podem ser observadas na Figura 3.7, as superfícies de resposta desses casos refletem mais sensibilidade que os casos anteriores (C113A, B, C e D). Esse aumento da sensibilidade na resposta do controlador é explicado pela sobreposição das funções adjacentes, ainda que tenha sido irregular. A consequência da irregularidade das funções (ou não simetria) pode ser observada pela irregularidade da resposta ao longo de toda a superfície, ocorrendo pequenos picos incoerentes sob a análise de um controlador humano. Em ambos os casos observou-se a ocorrência de platôs e vales, apresentando até 8,1 segundos de diferença na extensão para situações similares (mesmo comprimento de fila e um veículo de diferença na chegada veicular). Com isso, observa-se que não apenas os pontos de pertinência zero são responsáveis pela falta de sensibilidade do controlador, mas também a ausência de sobreposição das funções justapostas nos limites recomendáveis, contribuem para a formação de platôs ao longo da superfície de controle.



(a) caso C113E

(b) caso C113F

Figura 3.7 Superfície de controle dos casos C113E e C113 F

3.1.3 Influência no desempenho do tráfego

A análise de desempenho para os diferentes controladores semafóricos estudados (casos padrão, C113A, B, C, D, E, F, G e H) foi feita através de simulações realizadas no *software* HUTSIM. Para cada caso foi realizada uma hora de simulação de uma interseção isolada sem movimentos de conversão e de sentido único de tráfego. Os resultados das simulações foram agrupados em termos de porcentagem de paradas veiculares e atraso médio para a interseção, para a aproximação principal (1200 vph) e para a aproximação secundária (600 vph) (Figura 3.8).

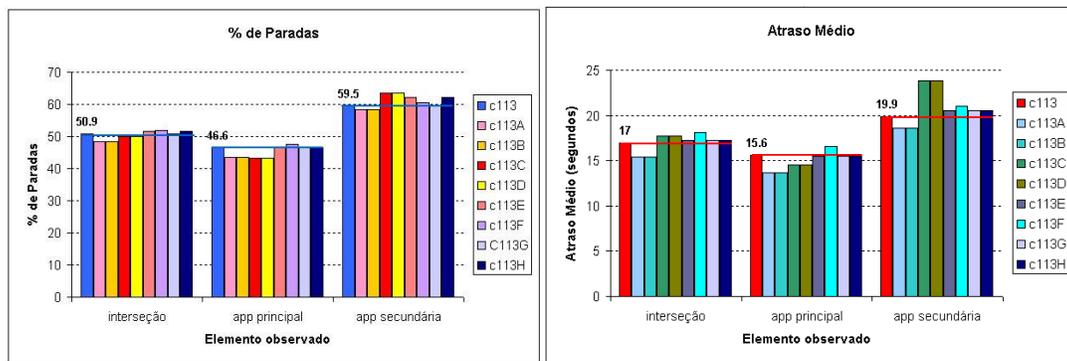


Figura 3.8 Porcentagem de Paradas e Atraso Médio para as simulações realizadas

Pelo gráfico apresentado na Figura 3.8, observa-se a variabilidade observada quando pequenos ajustes nos limites dos conjuntos *fuzzy* de entrada do controlador são realizadas. Dados os resultados de simulação, não foi identificado um padrão de melhoria em função das modificações realizadas nos conjuntos *fuzzy*, apenas a sensibilidade do tráfego frente às modificações realizadas ficou evidente. A sensibilidade do tráfego às modificações realizadas nos conjuntos *fuzzy* chegaram à ordem de 19% para a aproximação secundária e 16% para a aproximação principal e para a interseção.

É oportuno elucidar os resultados não negativos obtidos das simulações realizadas com controladores que apresentaram superfícies de controle consideradas inadequadas à aplicação. Nesse sentido cabe observar as limitações dos simuladores de tráfego, especialmente, relativo a percepções dos usuários do sistema. Sendo assim, embora tenha-se observado resultados de melhoria no aspecto de atrasos veiculares e número de paradas para alguns dos casos testados frente ao controlador padrão, é importante analisar cuidadosamente os elementos que influenciam neste resultado.

Como o simulador de tráfego utilizado (HUTSIM), da mesma forma que os outros simuladores geralmente empregados, não possui um elemento que represente a sensibilidade e reação do usuário frente a variações nos tempos semafóricos dados, esse elemento não influencia o resultado das simulações realizadas e aqui apresentadas. Conclui-se, portanto, que a combinação de extensões dadas por algumas das superfícies irregulares foram, para a situação de tráfego simulada, mais adequadas que a combinação apresentada pelo controlador padrão. No entanto, em uma situação real, em que os usuários reagem ao sistema de controle semafórico, o padrão de resposta que pode ser estabelecido pelo controlador irregular pode levar o usuário, em especial ao usuário cativo da região de controle, ao desrespeito da sinalização devido às variações “incoerentes” observadas na resposta do controlador.

Esta investigação remete à necessidade de estudos que orientem na adequação da partição do universo de discurso dos conjuntos *fuzzy* dos controladores semafóricos para diferentes situações de tráfego no sentido de melhorar o desempenho do controle.

3.2 ESTUDO COMPARATIVO DE CONTROLADORES DE MAMDANI E SUGENO PARA CONTROLE DO TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES ISOLADAS

Os controladores *fuzzy* descritos na literatura são classificados em função das características gerais do seu método de tomada de decisão. Embora existam diferentes métodos disponíveis (Lee, 1990b), de acordo com Sugeno (1985) os controladores *fuzzy* podem ser divididos em dois grandes grupos. O primeiro grupo contempla as estruturas baseadas nas funções de implicação *fuzzy* e em operadores de composição para a definição da saída *fuzzy* do controlador. Já os do segundo grupo dispensam a definição de funções de implicação e operadores para a inferência. Os controladores do tipo Mamdani, referidos nesta seção como “*controlador de Mamdani*”, são baseados no primeiro grupo, e os

controladores do tipo desenvolvido por Takagi e Sugeno, aqui referidos como “*controlador de Sugeno*”, fazem parte do segundo grupo.

Nos dois tipos de controladores a ação de controle é obtida por meio da definição de um conjunto de instruções (ou regras) de controle *fuzzy*, isto é de um algoritmo *fuzzy*. Essas regras são do tipo GMP (*Generalized Modus Ponens*), e uma dada regra (R_i) pode ser apresentada como:

Antecedente: $x \text{ é } A' \text{ e } y \text{ é } B'$

Regra (R_i): se $x \text{ é } A_i \text{ e } y \text{ é } B_i$ então $z \text{ é } C_i$

Conseqüente: $z \text{ é } C'_i$

em que x e y são variáveis lingüísticas relacionadas ao estado do processo e z é a variável lingüística de controle; A' , A_i , B' , B_i , C'_i e C_i são conjuntos *fuzzy* de x , y e z nos universos de discurso U , V e W , respectivamente. Como será apresentado a seguir, no caso do controlador de Sugeno, o conseqüente da regra não é um conjunto *fuzzy*.

De modo geral, os métodos de Mamdani e de Sugeno apresentam vantagens intrínsecas que podem ser utilizadas para orientar na escolha da alternativa mais adequada ao problema a ser tratado. A Tabela 3.2 traz uma síntese das principais vantagens dos métodos conforme é apresentado em MATLAB®(2008).

Tabela 3.2 Principais vantagens dos métodos de Mamdani e Sugeno

MÉTODO DE MAMDANI	MÉTODO DE SUGENO
É intuitivo	Computacionalmente eficiente
Tem aceitação amplamente difundida	Adequado para análises matemáticas
Fácil definição de variáveis através da linguagem humana	Adequado para técnicas lineares, otimização e técnicas adaptativas
-	Garante a continuidade da superfície de resposta

3.2.1 Controlador de Mamdani

Este controlador tem como base o trabalho pioneiro de Mamdani, publicado em 1973 (Sugeno, 1985). No algoritmo *fuzzy* do controlador, cada regra é uma proposição condicional *fuzzy*, e diferentes relações *fuzzy* em $U \times V \times W$ podem ser dela derivadas.

A implementação de cada regra é feita mediante a definição de operadores para o processamento do antecedente da regra e da função de implicação que irá definir o seu conseqüente. A ação do controlador *fuzzy* é definida pela agregação das n regras R_i que compõem o algoritmo, mediante o uso do conectivo “também”, o qual pode ser implementado por diferentes operadores. Esta agregação resulta no conjunto *fuzzy* C , que define a saída do controlador. A saída efetiva do controlador é então obtida por meio de um processo de defuzificação aplicado ao conjunto C .

As diferentes possibilidades para a implementação dos conectores das regras, das funções de implicação e do processo de defuzificação são amplamente discutidas na literatura (ver, por exemplo, Lee, 1990a e 1990b) e não são tratadas no presente estudo. O impacto da adoção de algumas dessas possibilidades e da definição dos conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada do controlador semafórico *fuzzy* foram objeto de pesquisas anteriores (Jacques *et al.*, 2002b, 2002c, 2003; Vaz, 2006).

3.2.2 Controlador de Sugeno

O controlador de Sugeno (Takagi e Sugeno, 1983) consiste numa simplificação do controlador de Mamdani, em que o conseqüente de cada regra é definido como uma função das variáveis lingüísticas de entrada. Isto é, a regra geral R_i pode ser escrita como:

$$\text{Regra } (R_i): \quad \text{se } x \text{ é } A_i \text{ e } y \text{ é } B_i \text{ então } z = f_i(x, y)$$

O resultado de cada regra é, portanto, um valor numérico (não um conjunto *fuzzy*), que assume como peso o valor da pertinência resultante do processamento do antecedente da regra. Sendo assim, não há necessidade de definir uma função de implicação específica para essa estrutura. A resposta final do controlador é obtida pela média ponderada das respostas das regras individuais. Isto é, neste tipo de controlador não cabe processo de defuzificação.

O valor de z pode também ser definido como um valor constante, que pode ser interpretado como um conjunto *fuzzy* com a característica especial de apresentar um único valor com pertinência igual a um e todos os demais com pertinência zero. Este tipo de conjunto *fuzzy* é denominado *singleton*, e o seu emprego permite a definição de regras com valores de

saída que representam uma classificação da resposta do controlador, sem alterar a forma simplificada da determinação da resposta final do controlador.

3.2.3 Implementação dos controladores em programa computacional

A implementação de um controlador *fuzzy*, para fins de utilização efetiva, requer o uso de programas computacionais. Atualmente, alguns programas de uso geral dispõem de módulos específicos para facilitar a realização desta tarefa, como é o caso do *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB[®], usado neste trabalho para implementar os dois tipos de controladores em estudo.

O programa permite ao usuário definir os quatro componentes principais do sistema de inferência *fuzzy*, que são: fuzificação dos valores das variáveis de entrada e aplicação dos operadores que podem estar presentes no antecedente das regras (“e” e “ou”); implicação do antecedente sobre o conseqüente (função de implicação); agregação dos conseqüentes de todas as regras definidas; e a defuzificação do conjunto *C* de resposta. No MATLAB[®], antes de iniciar a definição dos componentes do sistema, o usuário deve indicar se o seu controlador é do tipo Mamadani ou Sugeno. Dependendo do tipo selecionado, são liberados os campos pertinentes para a entrada dos dados. Isto é, se for selecionado o controlador de Sugeno, por exemplo, os campos referentes à função de implicação e agregação ficam desabilitados. O programa apresenta diferentes opções ao usuário para a configuração dos componentes do sistema e, para a maioria dos campos, também permite a definição de alternativas personalizadas (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Opções disponíveis para inferência *fuzzy* no *software* MATLAB®

Tipo de FIS		Mamdani	Sugeno
Operadores dos conectivos	AND	<i>Min</i> (mínimo) <i>Prod</i> (produto) <i>Custom</i> (operação personalizada)	<i>Min</i> (mínimo) <i>Prod</i> (produto) <i>Custom</i> (operação personalizada)
	OR	<i>Max</i> (máximo) <i>Probor</i> * <i>Custom</i> (operação personalizada)	<i>Max</i> (máximo) <i>Probor</i> * <i>Custom</i> (operação personalizada)
Funções de Implicação		<i>Min</i> (mínimo) <i>Prod</i> (produto) <i>Custom</i> (operação personalizada)	Indisponível
Funções de Agregação		<i>Max</i> (máximo) <i>Sum</i> (soma) <i>Probor</i> * <i>Custom</i> (operação personalizada)	Indisponível
Defuzificação		<i>Centroid</i> (centróide da área) <i>Bisector</i> (bissetor da área) <i>Mom</i> (médio do máximo) <i>Lom</i> (maior do máximo) <i>Som</i> (menor do máximo) <i>Custom</i> (operação personalizada)	<i>Wtaver</i> (média ponderada)** <i>Wtsum</i> (soma dos pesos)**

***Probor**: $y = \text{probor}(x)$ retorna o “ou” probabilístico das colunas de x . Se “ x ” tem duas colunas como $x = [a; b]$, então $y = a + b - a.b$. Se “ x ” tem apenas uma coluna, então $y = x$.

** Disponíveis no campo de defuzificação no MATLAB®,mas, efetivamente correspondem a alternativas de agregação dos resultados não-*fuzzy* das regras.

3.2.4 Estudo de Caso 1

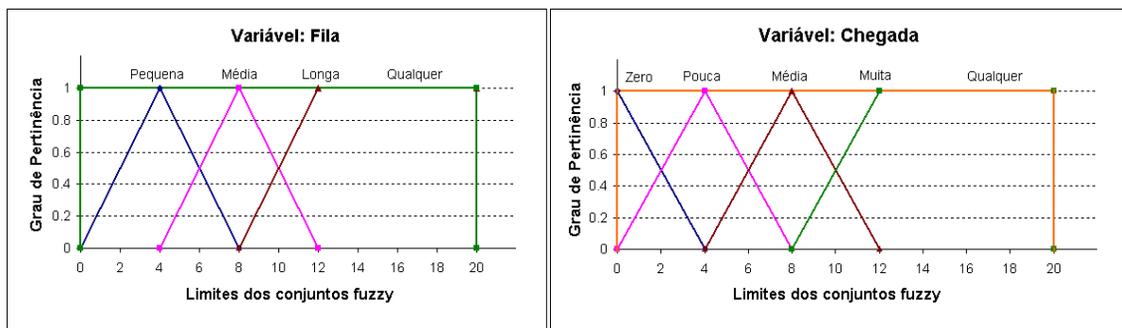
A avaliação do desempenho dos controladores de Mamdani e Sugeno foi realizada a partir da implementação de dois controladores de cada tipo, definidos com base em elementos básicos comuns. O funcionamento dos controladores foi, então, testado para o controle de uma interseção isolada formada por duas vias de sentido único, uma principal e outra secundária. Os testes foram realizados através de simulações da operação do tráfego no local, com o auxílio do programa HUTSIM (Kosonen, 1999).

a) Descrição das características gerais do controlador semafórico *fuzzy*

O controlador básico, que foi implementado posteriormente como controlador de Mamdani e Sugeno, possui as características básicas a seguir descritas.

- Variáveis de entrada e saída do controlador

As variáveis que descrevem o estado do sistema a ser controlado (variáveis de entrada) são “fila” (na aproximação que está recebendo indicação vermelha) e “chegada” (número de veículos presentes nos 100 m próximos à linha de retenção da aproximação que está recebendo sinal verde). A variável “fila” pode assumir os valores “pequena”, “média”, “longa” e “qualquer”, que são definidos como conjuntos *fuzzy*. No caso da variável “chegada”, os valores possíveis são “zero”, “pouca”, “média”, “muita” e “qualquer”. Os conjuntos *fuzzy* associados a estas variáveis, mostrados na Figura 3.9, são os mesmos definidos no estudo de Santos (2003), mais especificamente, o Caso 4 definido naquele trabalho. Dentre os casos estudados por Santos (2003), o Caso 4 apresentou os melhores resultados nas simulações realizadas em termos de atrasos e paradas veiculares. Estes conjuntos são derivados do controlador básico utilizado no trabalho de Andrade e Jacques (2006), definidos a partir do estudo de Niittymäki e Pursula (2000). Já a variável que descreve a saída do controlador é denominada “extensão”, e pode assumir os valores “zero”, “curta”, “média” e “longa”. Os conjuntos *fuzzy* que representam esses valores são definidos de forma diferente para os dois tipos de controladores e serão posteriormente apresentados.



(a) Conjuntos *fuzzy* da variável “fila”

(b) Conjuntos *fuzzy* da variável “chegada”

Figura 3.9 Conjuntos *fuzzy* de entrada do controlador básico

- Base de regras

O conjunto de regras utilizado para o desenvolvimento dos dois controladores é o apresentado na Tabela 3.4, formado por 14 regras. Esta base de regras também foi empregada no trabalho de Andrade e Jacques (2006).

Tabela 3.4 Base de regras do controlador *fuzzy*

Regra	se a “fila” é ...	e a “chegada” é ...	então a “extensão” é...
1	Quaquer	Zero	Zero
2	Pequena	Pouca	Curta
3	Média	Pouca	Zero
4	Longa	Pouca	Zero
5	Pequena	Média	Média
6	Média	Média	Curta
7	Longa	Média	Curta
8	Pequena	Muita	Longa
9	Média	Muita	Média
10	Longa	Muita	Média
11	<i>none</i>	Pouca	Curta
12	<i>none</i>	Média	Média
13	<i>none</i>	Muita	Longa
14	Longa	Qualquer	Zero

Para a implementação do antecedente das regras nos dois controladores foi utilizado o operador “*mínimo*” para o conectivo “*e*”.

- Condições gerais da operação

Na operação do controlador simulada no programa HUTSIM, os seguintes procedimentos são adotados:

- a) tempo mínimo de verde igual a 5 segundos para as duas aproximações;
- b) máximo de cinco extensões sucessivas de verde para cada aproximação;
- c) se uma extensão for calculada como inferior a 2 segundos, a extensão é concedida mas, ao seu final, nenhuma outra extensão é possível.

- Operadores utilizados na inferência *fuzzy*

A Tabela 3.5 apresenta os operadores utilizados na inferência *fuzzy* dos controladores testados.

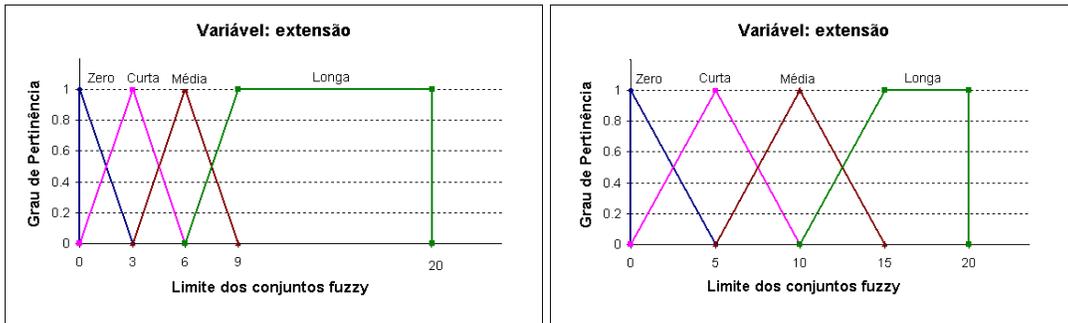
Tabela 3.5 Operadores dos controladores *fuzzy* testados

Controlador Tipo	Controladores 1 e 3 “MAMDANI”	Controladores 2 e 4 “SUGENO”
Conectivo AND	<i>Min</i>	<i>Min</i>
Conectivo OR*	-	-
Função de Implicação	<i>Min</i>	-
Função de Agregação	<i>Max</i>	-
Método de Defuzificação	<i>Centroid</i>	<i>Wtaver</i>

* não utilizado para os controladores semafóricos *fuzzy* em estudo.

b) Descrição do controlador do tipo Mamdani

Os controladores de Mamdani testados (Controladores 1 e 3), além dos aspectos básicos já descritos, tiveram os valores de suas variáveis de saída definidos pelos conjuntos *fuzzy* mostrados na Figura 3.10.

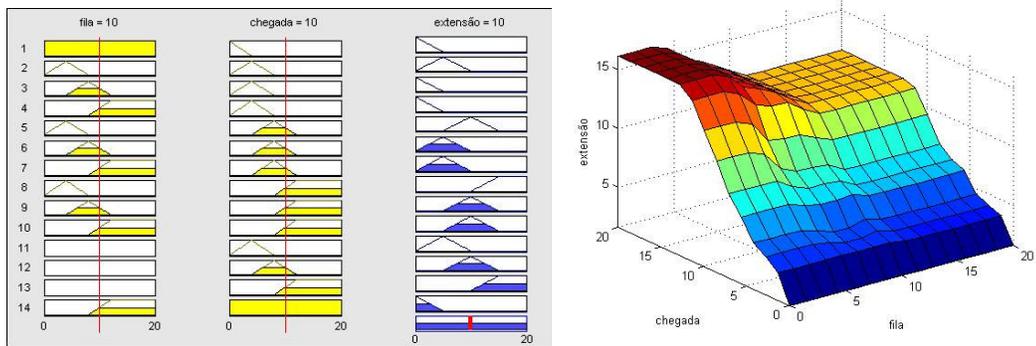


(a) Controlador 1

(b) Controlador 3

Figura 3.10 Conjuntos *fuzzy* da variável de saída do controlador de Mamdani

A função de implicação adotada foi a de Mamdani, implementada com o operador “*mínimo*”, e o método de defuzificação adotado foi o método do centro de gravidade, que assegura uma superfície de controle suave e contínua para esses controladores. Na Figura 3.11 são apresentadas, a título de ilustração, a base de regras implementada no MATLAB® e a superfície de resposta correspondentes ao Controlador 3.



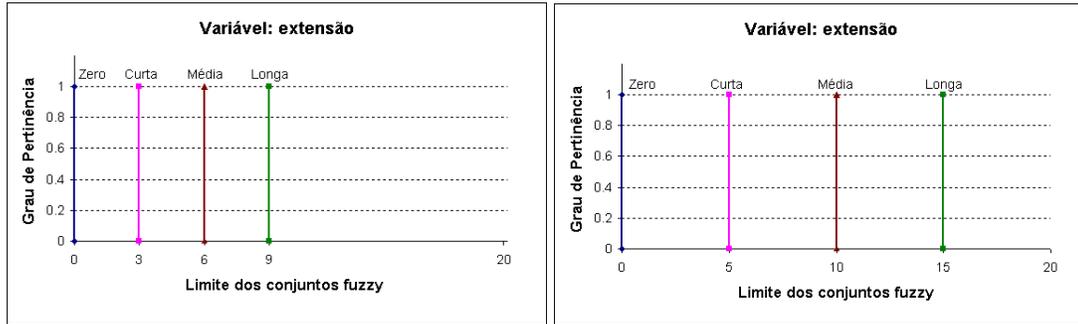
(a) Regras

(b) Superfície de controle

Figura 3.11 Base de regras e superfície de resposta do Controlador 3

c) Descrição do controlador do tipo Sugeno

Para efeito da descrição do controlador de Sugeno, cabe apenas acrescentar que, em conjunto com as características descritas no item “a” da seção 3.2.4, a variável de saída foi definida com base nos conjuntos *singleton* mostrados na Figura 3.12.



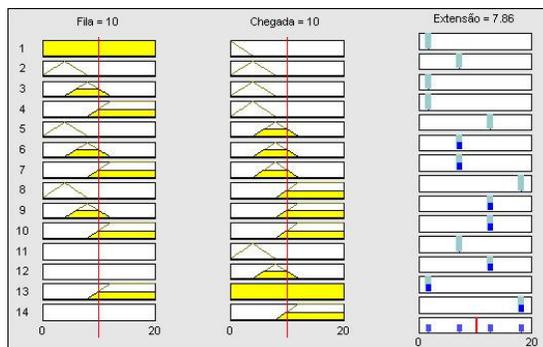
(a) Controlador 2

(b) Controlador 4

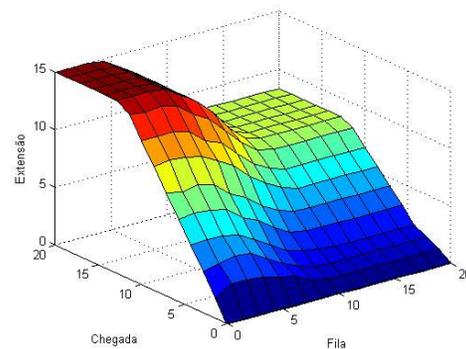
Figura 3.12 Valores da variável de saída do controlador de Sugeno

Os conjuntos *singletons* da variável extensão foram definidos a partir dos pontos de máximo da mesma variável dos controladores do tipo Mamdani (controladores 1 e 3), os quais já foram utilizados em estudos anteriores tais como o de Bingham (1998) e de Andrade e Jacques (2006).

A base de regras e a respectiva superfície de resposta do Controlador 4, implantado no MATLAB®, são apresentadas na Figura 3.13 a título de exemplo do funcionamento do controlador de Sugeno.



(a) Regras



(b) Superfície de controle

Figura 3.13 Base de regras e superfície de resposta do Controlador 4

d) Características da situação de controle considerada

Conforme já mencionado nos itens anteriores, o controle é realizado sobre uma interseção isolada, com duas vias de aproximação perpendiculares, compostas de duas faixas de trânsito de sentido único. A velocidade operacional da via é de 60 *km/h* e o tráfego é composto apenas de carros de passeio.

Foram realizadas 10 horas independentes de simulação para cada um dos controladores testados e para cada nível de volume estudado (Tabela 3.6), totalizando 120 horas de simulação.

Tabela 3.6 Volumes de tráfego simulados (dados em veículos/hora)

Volume	Via principal	Via secundária	Volume total
Baixo	600	200	800
Médio	1200	400	1600
Alto	1800	600	2400

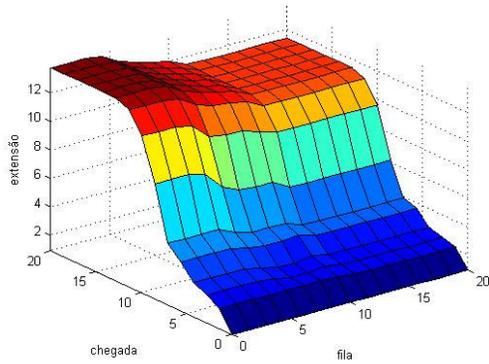
O controle semafórico estabelecido na simulação é bifásico para uma interseção isolada totalmente atuada sob o modo de controle *fuzzy*. Foram testados quatro controladores *fuzzy*, sendo dois do tipo Mamdani (Controladores 1 e 3) e dois do tipo Sugeno (Controladores 2 e 4).

3.2.5 Análise dos Resultados obtidos do Estudo de Caso 1

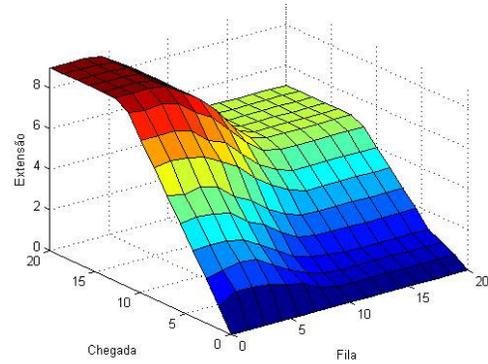
a) Análise das superfícies de resposta dos controladores

Ao analisar as superfícies de resposta dos controladores (Figura 3.14) e as tabelas de extensões de tempo de verde disponíveis no Anexo A, observa-se que as extensões de verde obtidas são, na maioria das vezes, maiores para os controladores do tipo Mamdani. Nesse sentido espera-se que os resultados de simulação apresentem como medidas do controlador, os tempos de ciclo e de verde médio menores para os controladores do tipo Sugeno. Espera-se ainda que estes controladores apresentem os melhores resultados sob as medidas de desempenho utilizadas (atraso médio e percentual de paradas veiculares).

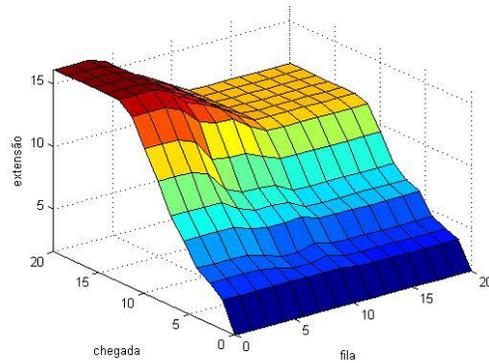
As diferenças das extensões de tempo de verde para os controladores de Mamdani e Sugeno são maiores para pequenos valores de chegada e para condições de tráfego mais carregadas, ou seja, para maiores valores de fila e chegada. Nesse sentido espera-se, ainda, que os controladores de Sugeno tenham melhores resultados para os maiores volumes de tráfego testados nas simulações.



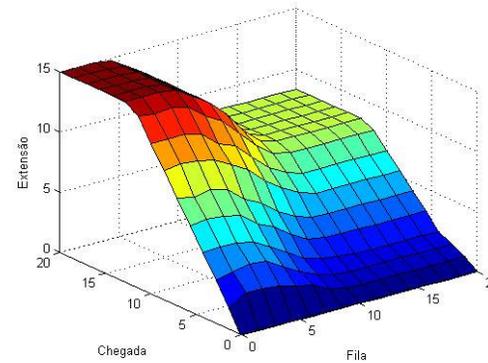
(a) Controlador 1



(b) Controlador 2



(c) Controlador 3



(d) Controlador 4

Figura 3.14 Superfícies de respostas dos controladores estudados

b) Análises dos resultados de simulação

As análises foram realizadas por pares de controladores: Controladores 1 e 2 (Tabela 3.7), e Controladores 3 e 4 (Tabela 3.8).

As diferenças percentuais dos valores médios dos resultados de simulação para os pares de controladores foram apresentadas para facilitar as análises comparativas. Para este fim, o controlador de Mamdani foi adotado como o elemento de referência para o estudo proposto (ver Equação 3.1).

$$DP = \frac{(VSi - VMi)}{VMi} \times 100 \quad \text{Eq. 3.1}$$

em que:

DP – Diferença Percentual

VS_i – Valor médio da variável i fornecido pelo controlador de Sugeno

VM_i – Valor médio da variável i fornecido pelo controlador de Mamdani

Foram realizados, também, testes de hipótese de igualdade entre médias para a avaliação da diferença dos controladores testados em termos de medidas de desempenho do tráfego (atraso médio e número de paradas veiculares) e da resposta dos controladores (tempo médio de verde e comprimento médio de ciclo). Para tanto, foi adotado o nível de significância $\alpha = 5\%$. Para a realização dos testes, os resultados de simulação (10 horas para cada caso) podem ser considerados conjuntos de dados emparelhados para cada hora de simulação independente, uma vez que o simulador utilizado permite gravar um padrão de chegadas veiculares e reutilizá-lo para vários testes. Nas Tabelas 3.7 e 3.8 os resultados dos testes realizados hachurados foram não significativos para o teste de hipótese realizado.

- *Controladores 1 e 2*

O desempenho do tráfego, analisado através das variáveis “*atraso médio*” e “*percentual de paradas veiculares*”, foi melhor sob o controle do tipo Sugeno, especialmente para os volumes veiculares alto e médio. Tal vantagem foi verificada tanto para a interseção como um todo, quanto para as aproximações consideradas individualmente (via principal e via secundária). Destes resultados, apenas em um caso (paradas veiculares para a via secundária sob volume alto) o controlador de Mamdani apresentou resultados melhores, sendo que a diferença observada para o controlador de Sugeno, para este caso, foi não significativa sob o teste de hipótese realizado (Tabela 3.7). Para o volume baixo os resultados mostram que o controlador de Sugeno tende a beneficiar a via secundária, trazendo prejuízo para a via principal, e conseqüentemente, para a interseção.

Na análise da resposta do controlador, os resultados apresentaram diferenças significativas, para um nível de significância de 5%. Pode ser observado que tanto os tempos médios de verde quanto o ciclo médio foram maiores para os controladores do tipo Mamdani. Sendo assim, fica evidente que o tipo de controlador utilizado impacta significativamente na resposta do controlador (tempo de verde e tempo de ciclo).

Tabela 3.7 Diferença percentual entre os resultados dos controladores 1 e 2, e significância segundo o teste de Hipótese

Volume	Desempenho do Tráfego						Resposta Controlador		
	Atraso Médio			% Paradas Veiculares			Verde Médio (s)		Ciclo (s)
	Int	Princ	Sec	Int	Princ	Sec	Princ	Sec	Int
Alto	-10.7	-12.0	-8.5	-8.0	-12.9	0.4	-18.5	-25.9	-17.0
Médio	-4.4	-1.7	-9.3	-3.0	-2.5	-4.0	-21.3	-16.3	-14.4
Baixo	2.3	8.9	-14.2	3.7	10.9	-12.1	-19.2	-3.6	-8.1

Valores hachurados são não significativos estatisticamente.

- *Controladores 3 e 4*

Ao avaliar as medidas de desempenho do tráfego, por meio das diferenças percentuais de atraso médio e de paradas veiculares para esse par de controladores, observou-se que o controlador de Sugeno (Controlador 3) apresentou melhores resultados para a maioria das situações avaliadas, com apenas dois resultados contrários, sendo que um deles foi não significativo (Tabela 3.8).

As diferenças relativas à resposta dos controladores (verde médio e comprimento de ciclo) foram todas significativas, e em todos os resultados as medidas do controlador de Sugeno foram menores. Novamente, comprova-se a influência do tipo de controlador utilizado na resposta de controle, bem como no desempenho do tráfego.

Os resultados obtidos (Tabelas 3.7 e 3.8) permitem ainda concluir que o desempenho do tráfego é, também, afetado pela interação entre o tipo de controlador utilizado e os volumes a serem controlados. Através da realização de uma Análise de Variância, considerando os fatores “controlador” e “volume”, ficou efetivamente comprovada a interação entre os fatores ao nível de significância de 5%, exceto para o atraso médio na via secundária.

Tabela 3.8 Diferença percentual entre os resultados dos controladores 3 e 4, e significância segundo o teste de Hipótese

Volume	Desempenho do Tráfego						Resposta Controlador		
	Atraso Médio			% Paradas Veiculares			Verde Médio (s)		Ciclo (s)
	Int	Princ	Sec	Int	Princ	Sec	Princ	Sec	Int
Alto	-23.2	-28.7	-11.8	-15.6	-24.6	2.9	-20.9	-39.2	-23.8
Médio	-20.2	-22.7	-15.1	-13.9	-20.3	-2.1	-33.7	-42.9	-30.5
Baixo	-9.1	-1.1	-24.4	-2.1	3.8	-12.8	-41.9	-27.9	-27.1

Valores hachurados são não significativos estatisticamente.

3.3 AVALIAÇÃO DA ESTRUTURA DA BASE DE REGRAS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O controlador semafórico de Pappis e Mamdani (1977), que é a principal referência de controladores semafóricos *fuzzy*, opera com base no princípio clássico da extensão. Um detalhe importante do algoritmo *fuzzy* desse controlador é que a determinação de cada extensão é feita a partir de um conjunto diferente de regras, isto é, a base de regras é particionada em subconjuntos que são acessados em momentos diferentes da ação de controle.

Vários dos controladores semafóricos *fuzzy* que sucederam ao controlador de Mamdani adotaram a mesma estrutura de base de regras, embora com algumas diferenças nas regras propriamente ditas. Dentre os controladores revisados por Jacques *et al.* (2002a), que são baseados no princípio da extensão *fuzzy*, somente no de Favilla *et al.* (1993) é adotada uma estrutura de base de regras unificada. Os controladores *fuzzy* desenvolvidos no âmbito da Universidade de Tecnologia de Helsinki (HUT), que têm sido testados com sucesso tanto em estudos de simulação quanto em testes de campo, são estruturados de maneira análoga ao controlador de Mamdani (Niittymäki, 1998; Niittymäki e Pursula, 2000; Niittymäki e Nevala, 2001). Nos documentos que descrevem esses controladores não é apresentada nenhuma justificativa para o uso da base de regras particionada, em oposição à possibilidade da adoção de um conjunto único de regras.

Neste contexto, o estudo desenvolvido e apresentado nessa seção tem por objetivo analisar o impacto da mudança na estrutura da base de regras de um dos controladores semafóricos *fuzzy* desenvolvidos na HUT, tanto sobre a resposta do controlador quanto sobre o desempenho do tráfego. Através da simulação do tráfego em uma interseção isolada, formada por duas vias de sentido único de circulação, o resultado da ação do controlador selecionado de base de regras particionada é comparado ao resultado de controladores de base de regras única. Considerando que a definição do conjunto de regras dos controladores semafóricos *fuzzy* é feita, em geral, a partir da abordagem do conhecimento do engenheiro de controle, a estrutura de regras particionada em diferentes subconjuntos impõe uma dificuldade adicional ao desenvolvimento do controlador. Assim, a possibilidade de se direcionar o desenvolvimento futuro de controladores semafóricos *fuzzy* para a utilização de base de regras única justifica a realização da pesquisa.

3.3.1 Controladores Semafóricos *Fuzzy* utilizados no estudo

O controlador desenvolvido por Niittymäki (1998) possui base de regras particionada, formada por cinco grupos de regras, e será referido ao longo desse texto como Controlador HUT. A partir desses conjuntos de regras foram desenvolvidos e testados controladores de base única. Além destes, foi incluído na análise o controlador utilizado em estudo anterior realizado por Andrade e Jacques (2006), que possui base de regras única constituída por 14 regras. Este controlador será denominado no presente trabalho como Controlador AJ-14R, e corresponde ao Controlador 2 do estudo de caso descrito na seção 3.2.4.

Nesses controladores, os conjuntos da variável de saída das regras *fuzzy* são do tipo *singleton* (um valor possui pertinência 1 e os demais têm pertinência zero). Constituem-se, portanto, em controladores do tipo Sugeno, cujas principais características são (Zimmermann, 1996):

- do mesmo modo que no controlador de Mamdani, os antecedentes das regras são conjuntos *fuzzy*;
- a consequência das regras gera valores numéricos, definidos como função das variáveis de entrada, ou expressos como valores constantes, equivalendo a conjuntos *fuzzy* do tipo *singleton*;
- os resultados das regras são agregados como médias ponderadas das ações de controle definidas através de cada regra;
- o peso de cada regra é o grau de pertinência definido pelo seu antecedente, calculado do mesmo modo que no controlador de Mamdani;
- não requer procedimento de defuzificação.

As variáveis lingüísticas de entrada são:

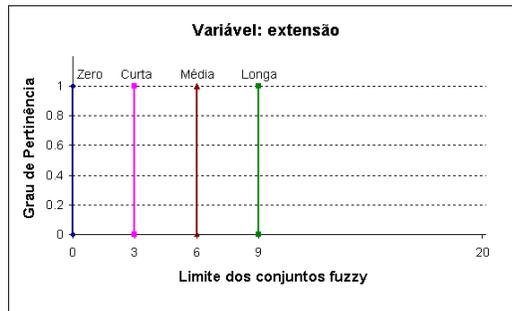
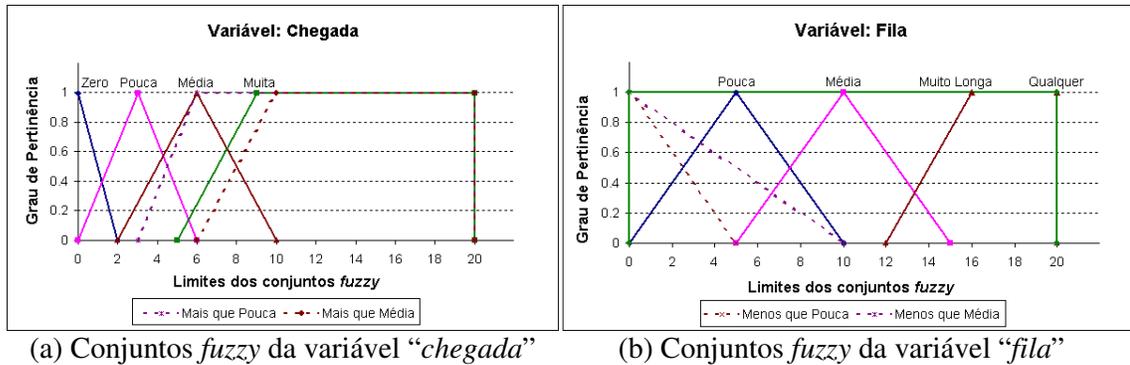
- *Fila*: caracterizada pelo número de veículos aguardando na aproximação que está recebendo indicação vermelha, cujos valores são definidos por meio de conjuntos *fuzzy*;
- *Chegada*: indica o número de veículos presentes nos 100 metros a montante da linha de retenção da aproximação que está recebendo verde, e seus valores são definidos como conjuntos *fuzzy*.

Para a implementação do conectivo “e” do antecedente de cada regra é empregado o operador “*mínimo*”. A variável de saída do controlador é “*extensão*”, que pode assumir os

valores lingüísticos “zero”, “curta”, “média” e “longa”, definidos como conjuntos *fuzzy* *singleton*.

a) *Controlador HUT*

O Controlador HUT possui uma base de regras com estrutura semelhante à proposta no trabalho pioneiro de Pappis e Mamdani (1977). Essa base de regras é apresentada na Tabela 3.9, e os conjuntos que definem as variáveis lingüísticas de entrada e saída do controlador são mostrados na Figura 3.15. Essas características do controlador foram extraídas da descrição do controlador de Niittymäki (1998) contida no trabalho de Bingham (1998).



(c) Conjuntos *fuzzy singleton* da variável “*extensão*”

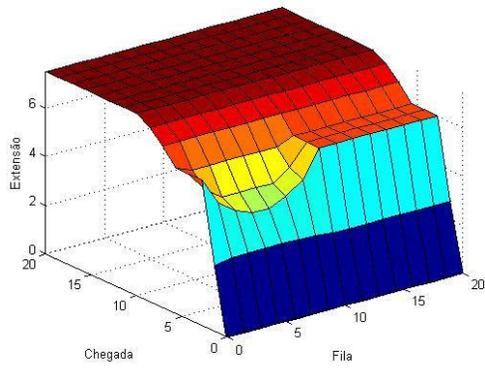
Figura 3.15 Variáveis de entrada e saída do Controlador HUT

Na Figura 3.16 são mostradas as superfícies de controle correspondentes a cada um dos cinco grupos de regras. Essas superfícies permitem verificar as diferenças entre as respostas do controlador na definição de cada uma das extensões, concedidas de forma sucessiva. Observa-se, por exemplo, que à medida que o número de extensões dadas aumenta, existe uma redução na sensibilidade do controlador para a variável chegada.

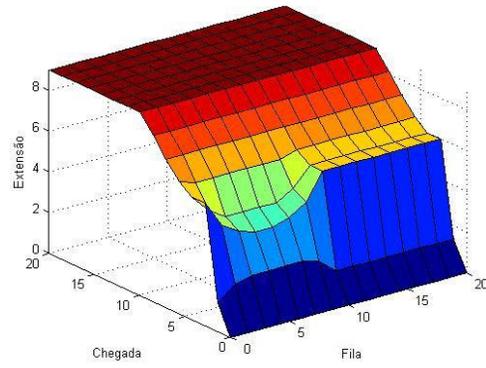
De forma geral, os grupos de regras 1 e 2 apresentam superfícies de resposta pouco sensíveis às filas formadas no vermelho, enquanto que a partir do grupo de regras 3 essa situação vai se invertendo até que, no grupo de regras 5, as extensões só são concedidas para o caso do número de veículos na fila ser inferior a 12. Para filas superiores, o controlador é totalmente insensível ao número de chegadas, não concedendo extensão do tempo verde (extensão = 0).

Tabela 3.9 Base de regras do Controlador HUT

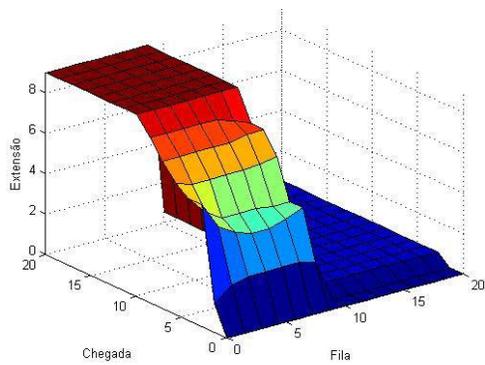
Regra	<i>se a “fila” é ...</i>	<i>e a “chegada” é ...</i>	<i>então a “extensão” é ...</i>
Grupo de regra 1: após o mínimo de verde, 5º segundo			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Qualquer	Mais que Pouca	Média
4	Qualquer	Mais que Média	Longa
Grupo de regras 2: após a primeira extensão de verde, 5ºseg + E1			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Qualquer	Média	Média
4	Qualquer	Muita	Longa
Grupo de regras 3: após a segunda extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Pouca	Curta
3	Menos que Média	Média	Média
4	Menos que Média	Muita	Longa
Grupo de regras 4: após a terceira extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2 + E3			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Mais que Pouca	Curta
3	Menos que Média	Média	Média
4	Menos que Pouca	Muita	Longa
5	Muito Longa	<i>none</i>	Zero
Grupo de regras 5: após a quarta extensão de verde, 5ºseg + E1 + E2 + E3 + E4			
1	<i>none</i>	Zero	Zero
2	Pouca	Mais que Pouca	Curta
3	Menos que Pouca	Média	Média
4	Menos que Pouca	Muita	Longa
5	Muito Longa	<i>none</i>	Zero



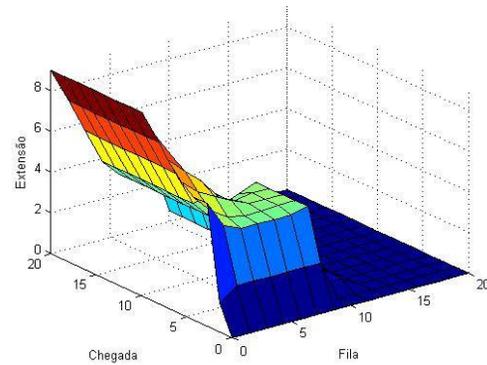
(a) Grupo de regras 1



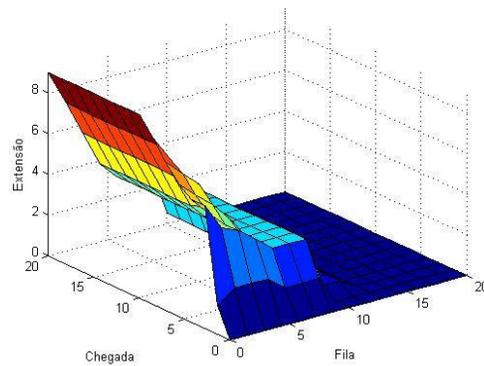
(b) Grupo de regras 2



(c) Grupo de regras 3



(d) Grupo de regras 4



(e) Grupo de regras 5

Figura 3.16 Superfícies de resposta para cada grupo de regras independentes do Controlador HUT

Um aspecto importante a considerar é que mudanças bruscas na resposta do controlador, como as verificadas nas superfícies das Figuras 3.16(c), 3.16(d) e 3.16(e), e inconsistência

lógica nessa resposta, como a caracterizada pelas depressões observadas nas superfícies das Figuras 3.16(a) e 3.16(b), são indesejáveis em controladores que atuam em sistemas reais. Mesmo quando o controlador produz resultados gerais satisfatórios, usualmente verificados através de simulação da operação do tráfego, essas características da superfície de resposta podem afetar a percepção do usuário com relação ao funcionamento adequado do controlador, trazendo insegurança e podendo, inclusive, levar ao desrespeito da sinalização proposta.

b) Controladores derivados do Controlador HUT

Para efeito do presente estudo foram desenvolvidos, a partir do Controlador HUT, três controladores de base de regras única. Isto é, alguns grupos de regras do controlador original foram adotados como a base de regra única dos novos controladores. Os critérios de escolha dos grupos originais de regras a serem testados foram a suavidade da superfície de resposta e a variabilidade das extensões às mudanças nos valores das variáveis de entrada. Estes critérios levaram à seleção dos grupos de regras 1, 2 e 3. Foram, portanto, derivados três controladores, HUT-RS1, HUT-RS2 e HUT-RS3, cujas bases de regras são, respectivamente, os grupos 1, 2 e 3 do controlador original.

c) Controlador de base única – Controlador AJ-14R

Os conjuntos *fuzzy* associados às variáveis de entrada (fila e chegada) são mostrados na Figura 3.9. A variável que descreve a saída do controlador é denominada “*extensão*”, e pode assumir os valores “*zero*”, “*curta*”, “*média*” e “*longa*”, representados pelos mesmos conjuntos *fuzzy* do Controlador HUT, mostrados na Figura 3.15(c). O conjunto de regras deste controlador é apresentado na Tabela 3.4 e a superfície de resposta correspondente é mostrada na Figura 3.11.

Como pode ser observado na Figura 3.14 (c), o controlador de base única apresenta uma superfície de resposta suave, onde o valor da extensão é consistentemente afetado pelas duas variáveis de entrada. Para valores de chegadas maiores que 12 veículos, entretanto, há tendência de redução da sensibilidade do controlador para essa variável. Ainda assim, o controlador é mais sensível às mudanças no número de chegadas veiculares durante o verde do que às variações no número de veículos na fila formada no vermelho.

3.3.2 Estudo de Caso 2

O desempenho do Controlador HUT, frente aos controladores com base de regras única, foi analisado a partir dos resultados das respostas do controlador e do desempenho do tráfego sob operação de cada controlador, obtidos com o auxílio do programa HUTSIM (Kosonen, 1999). Para essa investigação foram selecionados os controladores de base única descritos nos itens (b) e (c) da seção 3.3.1 deste documento, que são: HUT-RS1, HUT-RS2, HUT-RS3 e AJ-14R.

O controle semaforico estabelecido no estudo é aplicado a uma interseção isolada, com as mesmas características da estudada no Estudo de Caso 1, considerando também, os mesmos níveis de volume de tráfego (ver Tabela 3.6). Foram realizadas 10 horas independentes de simulação para cada um dos controladores testados e para cada nível de volume estudado (Tabela 3.6), totalizando 150 horas de simulação.

3.3.3 Análise dos Resultados Obtidos do Estudo de Caso 2

Os resultados das simulações foram analisados sob quatro medidas de desempenho: atraso médio, porcentagem de paradas veiculares, tempo médio de verde e ciclo médio.

A primeira etapa da análise consistiu em selecionar, dentre os três controladores derivados do Controlador HUT, o que obteve o melhor desempenho de acordo com as medidas definidas para este estudo. Este controlador representará a estrutura de base única de regras derivada de um controlador de base particionada, na comparação com o controlador original operando com todos os conjuntos de regras. A Figura 3.17 traz a representação gráfica dos valores médios das medidas de desempenho para os três controladores sob os três níveis de operação do tráfego. É possível verificar pela representação gráfica que o controlador HUT-RS3 alcançou os melhores resultados para todos os testes realizados, apesar das pequenas diferenças observadas entre o HUT-RS2 e HUT-RS3 para os volumes médio e volume baixo.

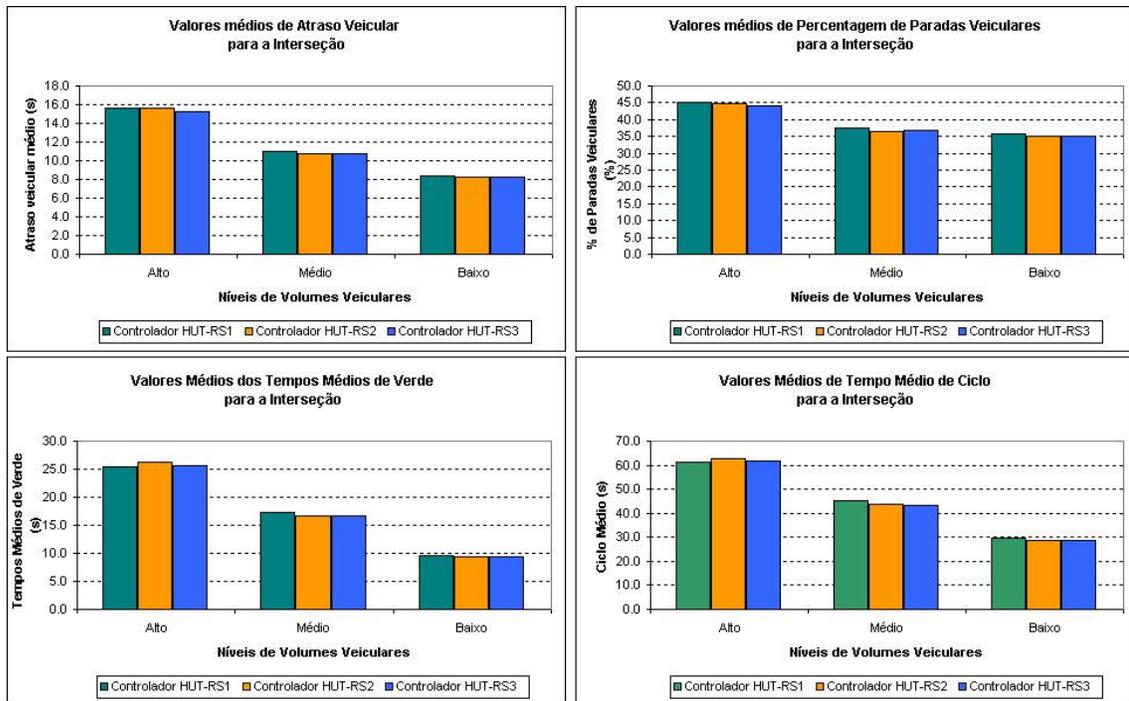


Figura 3.17 Valores Médios das medidas de desempenho para os controladores de base única de regras, derivados do Controlador HUT

A segunda etapa do estudo consiste de análises comparativas e estudos estatísticos referentes a duas comparações: (i) Controlador HUT *versus* Controlador HUT-RS3, que foi o controlador derivado do controlador original que apresentou os melhores resultados; e Controlador HUT *versus* Controlador AJ-14R.

Os resultados dos estudos comparativos são apresentados nas Tabelas 3.10 e 3.11. Nessas tabelas são mostradas as diferenças percentuais entre os valores médios dos resultados das 10 horas de simulação realizadas para cada controlador, para cada nível de volume estudado. Para facilitar a análise, o Controlador HUT foi utilizado como referência e, assim, a diferença percentual foi calculada a partir da Equação 3.2.

$$DP = \frac{(VBUi - VBPI)}{VBPI} \times 100 \quad \text{Eq. 3.2}$$

Em que:

DP – Diferença Percentual

$VBPI$ – Valor médio da variável i fornecido pelo Controlador HUT;

$VBUi$ – Valor médio da variável i fornecido pelo controlador de base de regras única.

Foram realizados, posteriormente, testes de hipóteses para verificação da igualdade entre as médias das medidas de desempenho do tráfego (atraso médio e número de paradas veiculares) e resposta dos controladores (tempo médio de verde e comprimento médio de ciclo) para $\alpha = 5\%$. Para a realização dos testes, os resultados de simulação (10 horas para cada caso) foram considerados conjuntos de dados emparelhados para cada hora de simulação independente, uma vez que o simulador utilizado permite gravar um padrão de chegadas veiculares e reutilizá-lo para diferentes testes. As Tabelas 3.10 e 3.11 trazem os valores das diferenças percentuais das medidas de desempenho utilizadas. Os valores hachurados foram não estatisticamente significativas para o nível de significância de 5%.

a) Análise comparativa dos Controladores HUT e HUT-RS3

As diferenças percentuais do Controlador HUT-RS3 em relação ao Controlador HUT (Tabela 3.9) variaram de 1,0% a 19,6% para as medidas de desempenho do tráfego. As menores diferenças foram observadas sob o volume médio para a interseção e para a via principal, que apresentou variação de 1,0% a 8,3%. Para os volumes alto e médio o Controlador HUT apresentou melhores resultados de desempenho do tráfego para todas as análises. Já na operação com volume baixo, este controlador tende a beneficiar a via secundária, trazendo prejuízo para a fluidez da via principal e para a interseção como um todo. Essa observação remete à hipótese de interação entre os fatores “*volume*” e “*controlador*”, a qual foi confirmada através da realização de uma análise de variância, onde também foi considerado o nível de significância de 5%.

Para as medidas relacionadas à resposta do controlador (verde médio e comprimento de ciclo) as diferenças foram mais expressivas, chegando a 43,7%. O Controlador HUT com base de regras particionada apresentou valores menores para verde médio e comprimento de ciclo.

Conforme as análises realizadas das superfícies de resposta para cada grupo de regras do controlador HUT (seção 3.3.1), observa-se que cada grupo apresenta uma estratégia pontual com vistas ao benefício com sua operação conjunta. Nesse sentido, os resultados obtidos mostram que a utilização de fragmentos de um controlador de base particionada para aplicação como controlador único não é adequada. É importante lembrar que o Controlador HUT-RB3, dentre os três controladores derivados testados, foi o que apresentou os melhores resultados na comparação com o Controlador HUT.

Tabela 3.10 Diferença percentual entre os resultados dos controladores HUT e HUT-RS3, e significância segundo o teste de Hipótese

Volume	Desempenho do Tráfego						Resposta Controlador		
	Atraso Médio			% Paradas Veiculares			Verde Médio (s)		Ciclo (s)
	Int	Princ	Sec	Int	Princ	Sec	Princ	Sec	Int
Alto	13.2	13.6	12.0	10.0	14.9	2.6	20.1	28.8	18.1
Médio	6.3	1.2	16.3	3.7	1.0	8.3	43.7	27.7	26.9
Baixo	-7.7	-16.0	19.4	-10.6	-19.6	15.2	37.9	4.0	13.0

Valores hachurados são não significativos estatisticamente.

b) Análise comparativa dos controladores HUT e AJ-14R

A comparação realizada entre os Controladores HUT e AJ-14R (Tabela 3.11) revela que para o volume alto, os controladores não apresentam diferenças significativas para as medidas de desempenho do tráfego, salvo para o atraso médio na via secundária, em que o controlador AJ-14R mostrou-se superior em 4%. Para os demais volumes (baixo e médio) ocorreram três situações com diferenças não significativas. Para o volume baixo o controlador AJ-14R apresentou melhores resultados em 100% dos casos, e para o volume médio este controlador privilegiou a via secundária. Diante destes resultados fica clara a possibilidade de interação entre “volume” e “controlador”, a qual foi investigada e comprovada através de uma análise de variância, para $\alpha = 5\%$.

Para as medidas relativas à resposta dos controladores observou-se que para os volumes alto e médio, tanto o verde médio, como o comprimento de ciclo, foram menores para o controlador AJ-14R. Para o volume alto as diferenças variaram de 10% a 13%, sendo todas significativas. Para o volume médio a maior variação ficou em 7,2% com um dos resultados não significativo. Finalmente, para o volume baixo, os valores de verde médio e comprimento de ciclo foram menores para o controlador HUT, no entanto as diferenças percentuais obtidas foram baixas (0,4% a 5%), sendo ainda uma delas não significativa.

Dos 27 testes realizados, 37% apresentaram diferenças não significativas. Dos 17 resultados com diferenças significativas, 71% foram indicativas da superioridade do controlador AJ-14R sobre o controlador HUT.

Tabela 3.11 Diferença percentual entre os resultados dos Controladores HUT e AJ-14R, e significância segundo o teste de Hipótese

Volume	Desempenho do Tráfego						Resposta Controlador		
	Atraso Médio			% Paradas Veiculares			Verde Médio (s)		Ciclo (s)
	Int	Princ	Sec	Int	Princ	Sec	Princ	Sec	Int
Alto	0.1	2.4	-4.0	2.0	2.9	0.7	-13.4	-10.8	-10.2
Médio	0.7	5.9	-8.7	3.0	7.3	-3.4	-7.2	-1.0	-3.6
Baixo	-4.0	-4.8	-1.3	-5.3	-6.9	-0.9	5.0	0.4	1.6

Valores hachurados são não significativos estatisticamente.

3.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS

O estudo realizado acerca do recobrimento dos conjuntos *fuzzy* foi estruturado sobre a avaliação de controladores cujos conjuntos *fuzzy* do controlador de base (Controlador 2) foram modificados manualmente, no sentido de reproduzir conjuntos similares aos obtidos pelo ajuste realizado pelo sistema *neuro-fuzzy* nos estudos de Bingham (1998). Foram também avaliadas alternativas intermediárias entre os conjuntos *fuzzy* obtidos do sistema *neuro-fuzzy* de Bingham e conjuntos *fuzzy* com padrões recobrimento recomendável (grau de sobreposição entre 25% e 75%, simetria das funções e uniformidade na distribuição das variáveis no universo de discurso).

Ao analisar as superfícies de resposta obtidas para este estudo é possível visualizar modificações bruscas na resposta do controlador localizadas nos pontos de abertura no universo de discurso, ou de recobrimento aproximadamente nulo. Esses pontos “quebra da suavidade” da superfície de resposta do controlador podem refletir em respostas incoerentes para o ambiente controlado e na instabilidade do sistema. Por exemplo, na Figura 3.5, se há uma fila de “7 veículos” com uma chegada de “8 veículos”, a extensão dada pelo controlador é de 4.5s, se na próxima avaliação for lido um veículo a mais nas chegadas veiculares, a extensão dada é mais que o dobro da definida no momento anterior anteriormente, ou seja, 10.0s. Diferenças bruscas podem resultar em instabilidade do sistema, bem como possibilitar a desobediência por parte do usuário, resultando numa situação de controle ineficiente e insegura.

O impacto causado na resposta do controlador é refletivo no desempenho do tráfego, ou seja, as variações nas medidas de desempenho utilizadas (atraso médio e % de paradas veiculares) chegaram a 19% para as vias secundárias e 16% para as aproximações das vias principais.

É ainda relevante complementar que a definição dos conjuntos *fuzzy* dos controladores semafóricos é realizada com base no conhecimento de especialistas, ou seja, a coerência dos conjuntos *fuzzy* com o conceito lingüístico é fundamental para a interpretação deste sistema. Assim, sistemas que realizam ajustes sem estabelecimento de restrições que garantam a forma coerente das funções de pertinência não são recomendáveis de aplicação para os controladores semafóricos. Estudos voltados à utilização de redes neurais para ajustar as funções de pertinência dos conjuntos *fuzzy* destes controladores são recomendados, porém, não há ainda disponível um sistema *neuro-fuzzy* com a possibilidade de impor restrições conforme mencionadas. Porém, investigações acerca de elementos que viabilizem o uso de restrições em sistemas conexionistas já estão em estudo (por exemplo, a definição da *epsilon-completude*, por Gonçalves, 2007), e sua conclusão bem sucedida viabilizará a continuidade dos estudos relacionados aos sistemas *neuro-fuzzy* mencionados.

Diante dos resultados obtidos nos dois estudos realizados acerca dos elementos dos controladores semafóricos *fuzzy* é possível observar que tanto o tipo do controlador *fuzzy* (Mamdani ou Sugeno) quanto a estrutura da base de regras da inferência *fuzzy* (base de regras única ou particionada) influenciam de modo significativo na resposta do controlador e no desempenho do tráfego. Os estudos mostram ainda que a escolha da melhor estrutura a ser utilizada em um dado projeto deve passar, especialmente, pela investigação dos volumes a serem controlados, uma vez que foi comprovada a interação entre “*volume*” e “*controlador*” para ambas as investigações.

Vale ressaltar que as vantagens dos controladores do tipo Sugeno sobre os do tipo Mamdani observadas no estudo desenvolvido devem ser somadas às vantagens de concepção destes controladores, uma vez que possuem menos elementos a serem definidos. A função de implicação e os métodos de defuzificação são elementos dispensáveis na concepção dos controladores do tipo Sugeno e, como pode ser observado na literatura (Jacques *et al.*, 2002b e 2002c), impactam significativamente no processo do controle realizado com o controlador tipo Mamdani.

A partir dos resultados da investigação sobre a estrutura da base de regras, acrescidos dos estudos disponíveis na literatura acerca da concepção de controladores semafóricos *fuzzy*, verifica-se que, de modo geral, a utilização de controladores *fuzzy* estruturados com bases de regras únicas é mais adequada para aplicação no controle semafórico devido à

simplicidade de concepção dessa estrutura quando comparada à necessidade da definição de grupos distintos de regras para cada atuação do controlador no atendimento a uma mesma aproximação, como é requerido no caso dos controladores de base particionada. O estudo mostrou que é possível obter para esse tipo de controlador desempenho comparável, em alguns casos até superior, ao propiciado pelo controlador de base particionada. Entretanto, a definição das regras que irão formar a base de regras única é um elemento crítico no projeto do controlador. Conforme mostrado na presente pesquisa, a adoção de uma base de regras inadequada impacta negativa e severamente o desempenho do tráfego controlado.

4 ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DA OPERAÇÃO EM REDE DO CONTROLE SEMAFÓRICO DO TIPO *FUZZY*

Este capítulo apresenta a concepção, o desenvolvimento e as análises relativas ao Grupo de Estudos 2 definido no 1.6.3 da metodologia. Compõe essa etapa um conjunto de estudos, baseados em simulação, da operação em rede aberta de controladores semafóricos *fuzzy*. O controlador *fuzzy* aqui utilizado faz parte deste trabalho em outras investigações, conforme apresentado no Capítulo 3 deste texto.

Para a realização dos estudos foram definidas diferentes configurações de rede, bem como diferentes padrões de tráfego no sentido de avaliar o desempenho do controlador *fuzzy* disposto em rede. A referência adotada para o comparativo proposto é o controle semafórico por tempo fixo operando em rede de modo coordenado, pois, se esta programação semafórica é feita para uma situação de tráfego bem definida, ocorrendo pequenas variações randômicas na geração de veículos, o resultado deve ser um controle de alta qualidade.

Por fim foram realizadas análises de variância multifatorial para verificar a influência das variáveis consideradas no desempenho do tráfego com o propósito de avaliar a adequação de coordenação de controladores semafóricos *fuzzy*, bem como orientar as alternativas para a realização desta coordenação. Os resultados apresentados comprovam a adequação da investigação proposta na tese de buscar uma forma de coordenação para esses controladores.

4.1 DEFINIÇÃO DOS MODELOS PARA SIMULAÇÃO

Um modelo de simulação de tráfego contempla as definições geométricas da rede ou interseção (número de faixa e suas larguras, distância das faixas de retenção, localização dos semáforos, distância entre as interseções da rede, dentre outros), as definições de operação (modo de controle semafórico, movimentos veiculares, velocidades de operação, volumes veiculares) e as medidas de desempenho utilizadas para as análises em questão. Essas definições devem ser feitas em função do propósito do estudo e do simulador empregado (características e limitações).

Em relação ao simulador é fundamental identificar o modelo de tráfego utilizado, as principais medidas de desempenho calculadas pelo programa, bem como os modos de controle de tráfego disponíveis e as limitações do *software*.

O simulador de tráfego utilizado neste trabalho é o UnB-Sitracs. Trata-se de um simulador microscópico, com características predominantemente acadêmicas, capaz de reproduzir três modos de controle (por tempo fixo, semi-atuado e *fuzzy*) tanto para operação isolada quanto para a operação em rede. Este *software* foi desenvolvido pelo Departamento de Ciência da Computação no âmbito da Universidade de Brasília, como parte do projeto “Controle do tráfego em redes urbanas com o uso de controladores semafóricos *fuzzy*”, projeto do qual a tese em questão faz parte. O arquivo do simulador e o Manual do Usuário do UnB-Sitracs são disponíveis livremente na internet no endereço <http://sourceforge.net/projects/unb-sitracs/files/>.

4.1.1 Características básicas do UnB-Sitracs

(a) Modelos utilizados no UnB-Sitracs

Os principais modelos utilizados no UnB-Sitracs estão relacionados a três elementos da simulação: a geração do fluxo de tráfego, o comportamento dos veículos na abordagem microscópica e o procedimento de trocas de faixas.

- *Geração do fluxo de tráfego*: os veículos são gerados em função do *headway* (Equação 4.1), que é a diferença de tempo observada entre a passagem de dois pontos comuns de dois veículos por uma dada seção de via. Esse valor é obtido em função de um *headway* mínimo (t_0) e do volume de tráfego médio (para calcular o *headway* médio), definidos pelo usuário; de um valor pseudo-aleatório criado pelo programa (U) e de uma função de probabilidade definida em termos de uma função exponencial negativa e deslocada para a direita em t_0 . Esse deslocamento garante que o *headway* (t) calculado não seja menor que o *headway* mínimo (t_0) definido pelo usuário.

$$t = t_0 - [(t-t_0) \times \ln(1-U)] \quad \text{Eq. 4.1}$$

- *Comportamento dos veículos na abordagem microscópica*: para simular a reação de cada veículo na corrente de tráfego, é empregado o modelo *car following* de Gipps (1981). Esse modelo calcula a velocidade do veículo em função da

velocidade desejada, da taxa de aceleração e dos elementos que interagem com o veículo (outros veículos ou semáforos). Sob o aspecto de segurança, a taxa de desaceleração definida pelo usuário pode assumir valores superiores no sentido de evitar colisões. No UnB-Sitracs o *gap* mínimo (distância mínima entre o pára-choque traseiro de um carro e o pára-choque dianteiro do carro seguinte a este) assume por *default* o valor zero. Como na operação real os veículos não permanecem em fila com esse comportamento, é sugerido ao usuário adotar na definição do seu modelo no UnB-Sitracs, um valor entre 0,5 a 1,7m para o *gap* mínimo.

- *Procedimento de troca de faixa*: o programa adota a estrutura de decisão para mudança de faixa proposta por Gipps (1986). Os principais elementos da estrutura de decisão extraídos deste trabalho para o *software* UnB-Sitracs são: (i) a seleção das faixas, (ii) a possibilidade de mudar de faixa, (iii) o comportamento do motorista próximo a uma interseção desejada, (iv) urgência de mudar de faixa, (v) faixas exclusivas, (vi) entrada de veículos não permitidos em faixa exclusiva, (vii) saída de veículos não permitidos e faixa exclusiva, (viii) comportamento do motorista a uma distancia média, (ix) vantagens relativas da faixa atual e da faixa alvo, (x) efeito de veículos pesados, (xi) o efeito do veículo à frente, (xii) segurança e (xiii) mudança da faixa alvo. O detalhamento de cada um desses elementos é apresentado no Manual do UnB-Sitracs (UnB-Sitracs, 2009).

(b) Medidas de Desempenho disponíveis no UnB-Sitracs

Conforme é apresentado no Manual do Usuário (UnB-Sitracs, 2009), este simulador determina e apresenta no seu relatório básico de saída as seguintes medidas de desempenho: número médio de paradas por veículo; percentagem de paradas; atraso médio por veículo; tempo médio de verde das fases semaforicas e velocidade média, conforme detalhamento apresentado na Tabela 4.1. Vale ressaltar que o termo “*fase*”, aqui utilizado, corresponde ao conceito de “*estágio*” proposto no Manual de Semáforos do DENATRAN (1984).

Tabela 4.1 Médias de desempenho determinadas pelo UnB-Sitracs

Medidas de desempenho	Descrição	Formulação	Elementos da formulação
Nº médio de paradas por veículo	<p>Contabiliza o número de paradas⁽¹⁾ realizada por cada veículo, e calcula a sua média durante a simulação.</p> <p>Essa medida é calculada ao longo dos segmentos viários⁽²⁾ entre interseções (ou entre um gerador e uma interseção) e também para a rede simulada como um todo.</p>	$NMP = \frac{\sum_{i=1}^n NP_i}{n}$	<p><i>NMP</i> = número médio de paradas por veículo</p> <p><i>NP_i</i> = número de paradas sofridas pelo veículo “<i>i</i>”</p> <p><i>n</i> = número total de veículos simulados</p>
% de paradas veiculares	<p>Indica a percentagem dos veículos simulados que sofreu uma ou mais paradas⁽¹⁾.</p> <p>Assim como número médio de parada por veículos, a percentagem de paradas também é determinada para cada segmento⁽²⁾ entre interseções (ou entre um gerador e uma interseção) e para toda a rede simulada.</p>	$PP(\%) = \frac{NVP}{n} \times 100$	<p><i>PP</i> = percentagem de paradas veiculares</p> <p><i>NVP</i> = número de veículos de <i>NP_i ≥ 1</i></p> <p><i>n</i> = número total de veículos simulados</p>
Atraso médio por veículo	<p>É definida pela diferença entre o tempo efetivamente gasto pelo veículo para percorrer determinada distância⁽²⁾ e o tempo em que ele percorreria essa distância se estivesse viajando na velocidade desejada.</p> <p>Também é calculada por segmento e para toda a rede simulada, nesse último caso acumulando os dados para todos os segmentos considerados (integrantes da via principal e da via secundária).</p>	$AM = \frac{\sum_{i=1}^n Tr_i - Tid_i}{n}$	<p><i>AM</i> = atraso médio por veículo (<i>s</i>)</p> <p><i>Tr_i</i> = tempo real gasto pelo veículo “<i>i</i>” para percorrer uma dada distância (<i>s</i>)</p> <p><i>Tid_i</i> = tempo ideal para que o veículo “<i>i</i>” percorresse essa dada distância (se viajasse na velocidade desejada) (<i>s</i>)</p>

⁽¹⁾ Parada veicular: considera-se que um veículo efetua uma parada sempre que as condições do tráfego fazem com que sua velocidade seja igual ou inferior a 3,6km/h (1m/s). Como a simulação com o UnB-Sitracs é feita a intervalos regulares de tempo (passos), após contabilizar uma parada, uma nova parada só é contada quando a velocidade do veículo subir e depois descer novamente, atingindo valor igual ou inferior a 3,6km/h.

⁽²⁾ O comprimento do trecho viário considerado no cálculo das medidas é definido pelo usuário na janela de edição do semáforo, no campo “Distância do início das medidas”. Em caso de semáforos seqüenciados, ao atribuir ao campo “Distância do início das medidas” o valor zero, o programa considera a distância entre a linha de retenção do semáforo e a linha de retenção do semáforo a montante.

Continuação da Tabela 4.1

Medidas de desempenho	Descrição	Formulação	Elementos da formulação
Tempo médio de verde	<p>É uma medida relevante para o caso do controle semafórico do tipo atuado pelo tráfego, uma vez que o controle por tempo fixo tem a duração de verde de cada fase constante para todos os ciclos simulados.</p> <p>Após o estado de cada fase mudar do verde para o amarelo, o tempo em que o foco verde permaneceu ativo é registrado e armazenado cumulativamente. O número de vezes em que o foco verde foi ativado durante a simulação também é registrado. Assim, a relação entre o total de tempo verde e o número total de vezes em que o verde foi apresentado permite o cálculo do tempo médio de verde de cada fase.</p>	$TMV = \frac{\sum_{i=1}^{nf} Tv_i}{nf}$	<p>TMV = tempo médio de verde de uma fase</p> <p>Tv_i = tempo de verde da i-ésima vez que o foco verde permaneceu ativo</p> <p>nf = número de vezes que o foco verde permaneceu ativo</p>
Velocidade média	<p>Essa medida é calculada por veículo, mediante a relação entre o espaço percorrido e o tempo para percorrê-lo, ou seja, esse espaço corresponde a um segmento de via⁽²⁾ localizado entre semáforos sucessivos (ou entre um gerador e uma interseção).</p> <p>É calculada para cada segmento viário.</p>	$Vm = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{T_i} \times 3,6$	<p>Vm = velocidade média (km/h)</p> <p>L_i = comprimento do segmento viário percorrido (m)</p> <p>T_i = tempo gasto para percorrer o segmento viário L_i (s)</p> <p>n = número de veículos</p>

⁽¹⁾ Parada veicular: considera-se que um veículo efetua uma parada sempre que as condições do tráfego fazem com que sua velocidade seja igual ou inferior a 3,6km/h (1m/s). Como a simulação com o UnB-Sitracs é feita a intervalos regulares de tempo (passos), após contabilizar uma parada, uma nova parada só é contada quando a velocidade do veículo subir e depois descer novamente, atingindo valor igual ou inferior a 3,6km/h.

⁽²⁾ O comprimento do trecho viário considerado no cálculo das medidas é definido pelo usuário na janela de edição do semáforo, no campo “Distância do início das medidas”. Em caso de semáforos seqüenciados, ao atribuir ao campo “Distância do início das medidas” o valor zero, o programa considera a distância entre a linha de retenção do semáforo e a linha de retenção do semáforo a montante.

4.1.2 Definições dos elementos do modelo de simulação

Os elementos do modelo de simulação que devem ser definidos passam por elementos de operação do tráfego, de geometria da rede, finalizando com os controladores semafóricos.

Operação do tráfego

Os elementos de operação do tráfego contemplam as velocidades de operação, o fluxo veicular, a composição do tráfego e a caracterização operacional dos tipos de veículos utilizados. Tais elementos são descritos nos tópicos seguintes.

(a) *Velocidade*

Uma vez que o estudo é proposto para a operação semafórica em ambiente urbano, foi adotada a velocidade de 50km/h como predominante, representada por 70% dos veículos que entram no simulador. Como o UnB-Sitracs permite a definição de uma distribuição das velocidades no sentido de melhorar a representação do cenário em simulação, segue apresentado na Tabela 4.2 a distribuição de velocidades utilizada nos modelos estudados.

Tabela 4.2 Distribuição de velocidade para a geração de veículos

Percentual	Velocidade (km/h)
2%	30
15%	40
70%	50
10%	60
3%	70
Resumo	$V_{mo} = 50 \text{ km/h}$
	$V_m = 49,7 \text{ km/h}$

V_{mo} : velocidade modal

V_m : velocidade média

(b) *Volume de tráfego*

Os volumes de tráfego a serem simulados foram definidos para representar três níveis de operação de uma rede aberta composta por uma via principal e quatro vias transversais. O volume veicular das vias transversais é da ordem de 30% do volume da via principal.

Os níveis de volume foram definidos em função dos graus de saturação das interseções. Para essa definição foram realizadas programações semaforicas para diferentes volumes de tráfego, conforme apresentado no Apêndice B deste documento.

A Tabela 4.3 apresenta os volumes veiculares definidos para atender aos níveis de operação requeridos para os estudos. Estes são representados pelos graus de saturação associados a cada nível de volume estabelecido.

Tabela 4.3 Volumes semaforicos e graus de saturação

Classificação do Volume	Volume ⁽¹⁾		X ⁽²⁾	
	Princ	Sec	Princ	Sec
1 (alto)	2.200	660	0,89	0,87
2 (médio)	1.600	500	0,72	0,72
3 (baixo)	1.200	400	0,50	0,50

⁽¹⁾ Volume é dado em veículos/hora.

⁽²⁾ Grau de Saturação

(c) *Tipo de volume de tráfego*

Conforme já foi discutido nos capítulos anteriores, o controle do tipo *fuzzy* é atuado pelo tráfego e opera no sentido de ajustar os tempos das fases, dentro de um limite pré-definido, às condições operacionais. Diante dessa característica, optou-se por investigar também, o impacto no controle sob duas situações de volume de tráfego – uma considerando no gerador o volume médio horário, e outra variando o volume médio horário de acordo com dados coletados em campo para cada cinco (5) minutos de simulação. A expectativa é que o resultado para o controle *fuzzy* realizado com o volume variável a cada 5 minutos seja tão bom quanto seu resultado para o volume médio e, ainda, que para o controle por tempo fixo a operação com volume variável seja mais desfavorável.

Os dados de variação do volume de tráfego ao longo da hora foram coletados em uma via arterial na cidade de Brasília. As taxas de variação e os valores de volume adotados nas simulações são apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 Volumes Veiculares Variáveis médios

Volume Médio ⁽¹⁾	Volume 1		Volume 2		Volume 3	
	Princ.	Sec.	Princ.	Sec.	Princ.	Sec.
Taxas	2200	660	1600	500	1200	400
-1.40	2169	651	1578	493	1183	394
9.20	2402	721	1747	546	1310	437
-23.24	1689	507	1228	384	921	307
16.07	2554	766	1857	580	1393	464
12.32	2471	741	1797	562	1348	449
-7.64	2032	610	1478	462	1108	369
4.21	2293	688	1667	521	1251	417
-16.38	1840	552	1338	418	1003	334
-1.40	2169	651	1578	493	1183	394
13.57	2499	750	1817	568	1363	454
-8.89	2004	601	1458	456	1093	364
3.59	2279	684	1657	518	1243	414

⁽¹⁾ Os volumes veiculares são dados em veículos por hora.

Os valores médios finais obtidos para a variação a cada 5 minutos coincidem com o volume médio horário. No resultado final das simulações verifica-se que o número total de veículos simulados considerando-se um volume médio fixo para a hora é bem próximo do simulado na situação em que o volume médio varia a cada 5 minutos, sendo que a diferença decorre da aleatoriedade do processo de geração.

(d) Composição veicular e caracterização operacional

Com vistas a minimizar o número de elementos intervenientes na corrente de tráfego, a composição veicular dos modelos de simulação foi reduzida a um único tipo de veículo, conforme é apresentado na Tabela 4.5. As características operacionais do veículo utilizado nos estudos seguem apresentadas na Tabela 4.6.

Tabela 4.5 Composição veicular

Composição Veicular (%)	
Carro	100
Ônibus	0
Moto	0
Caminhão Leve	0

Tabela 4.6 Caracterização operacional por tipo de veículo

Tipo de veículo: Carro	
Gap mínimo (s)	0.80
Aceleração Média (m/s^2)	1.60
Aceleração Máxima (m/s^2)	2.20
Desaceleração (m/s^2)	-1.90
Comprimento (m)	4.00
Distância de visão máxima (m)	300
Tempo de Reação (s)	1.00
<i>Headway</i> Mínimo (s)	1.00

Geometria da rede

Outro conjunto de elementos a ser definido é relativo à geometria da rede, que contempla a largura das vias, o número de faixas de fluxo, o posicionamento das faixas de retenção, a declividade das vias, o número de interseções da rede e a distância entre as interseções.

Em função do objetivo dos estudos ser voltado para redes arteriais urbanas, a caracterização teórica da rede busca replicar esta configuração. Outro aspecto já mencionado é a busca de simplicidade da rede para minimizar o número de elementos intervenientes que não fazem parte do escopo da pesquisa em questão.

Assim, conforme ilustra a Figura 4.1, a rede arterial estudada é composta de quatro (4) interseções seqüenciais distanciadas entre si de “A” e “B” metros. O trecho horizontal representa a via principal e os trechos perpendiculares, as vias secundárias. Não são contempladas curvas horizontais e a declividade é nula. As faixas de retenção são posicionadas a $1m$ da interseção, para as todas as aproximações. As vias são compostas de duas (2) faixas por aproximação, sendo cada faixa de $3.5m$ de largura. Vale ressaltar aqui que a rede opera em sentido único de tráfego e não são permitidos movimentos de conversão nas interseções. A mudança de faixa é permitida.

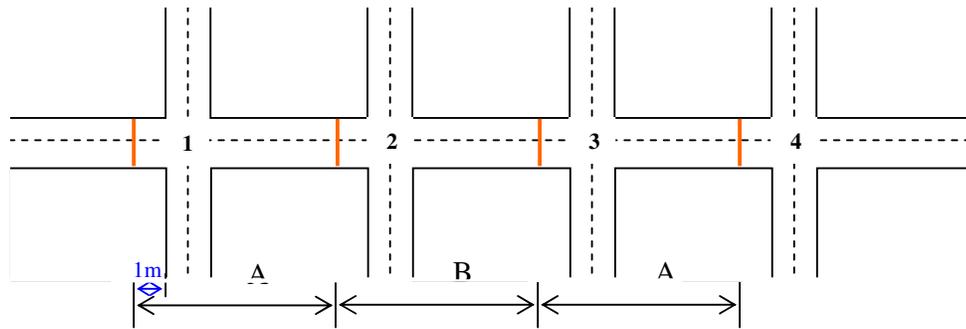


Figura 4.1 Representação geral do trecho viário estudado

Os espaçamentos entre as interseções podem ser apresentados de duas formas: (i) todos os espaçamentos iguais, ou seja, $A=B$, ou, (ii) trecho 1-2 e trecho 3-4 espaçados de A , diferentes do trecho 2-3 (B metros) (Figura 4.1). A definição dos espaçamentos utilizados no estudo contemplou um pré-estudo com 14 configurações de rede (Tabela 4.7), que foram avaliadas sob o atraso médio e o percentual de paradas veiculares para a operação semafórica *fuzzy*. Os espaçamentos definidos para o pré-estudo foram estabelecidos em função dos limites propostos na literatura acerca da coordenação semafórica para o controle por tempo fixo (SDD, 1973; Austroads, 2003; CAMUTCD, 2003; Yang *et al.* 2006; FHA, 2009).

Tabela 4.7 Configurações de redes do pré-teste

Rede	Espaçamento ⁽¹⁾ A-B-A	Rede	Espaçamento ⁽¹⁾ A-B-A
1	100-100-100	8	600-600-600
2	150-150-150	9	100-200-100
3	200-200-200	10	150-350-150
4	250-250-250	11	200-500-200
5	300-300-300	12	250-150-250
6	400-400-400	13	300-100-300
7	500-500-500	14	500-200-500

⁽¹⁾ Distância dada em metros.

As Figuras 4.2 e 4.3 trazem as representações gráficas das medidas de desempenho (atraso médio e % de paradas veiculares) para os testes realizados para 14 configurações de rede, volume médio “alto” (2200 x 660 vph) e velocidade $V_{mo} = 50 \text{ km/h}$.

As simulações realizadas apresentaram bons resultados em termos de atraso veicular para a rede com interseções distanciadas até 150m, mostrando a capacidade de o controlador *fuzzy* realizar um controle satisfatório nessas condições de espaçamento das interseções. Em

termos de paradas veiculares, essa característica do controlador foi observada para o distanciamento de 100m. À medida que o espaçamento entre as interseções aumenta, tal capacidade é perdida, ou seja, os valores das medidas de desempenho variam, em geral aumentando, para as interseções seqüenciadas à jusante (interseções 2, 3 e 4).

Para o atraso médio, as redes com distanciamento de 200 a 250m, não apresentaram resultados característicos de movimento progressivo (redução crescente das medidas de desempenho ao longo da rede), no entanto, foi observado que a operação da rede como um todo apresenta resultados melhores que os observados para a primeira interseção da rede, que embora possa sofrer influência da fila formada à jusante, ainda é a interseção menos afetada pela operação da rede.

Ao realizar a mesma análise para as redes com espaçamento entre 300m e 600m, os resultados de atraso médio para o sistema foram sempre superiores aos observados na primeira interseção. Pode ainda ser verificado no gráfico o aumento desta medida de desempenho para as interseções sucessivas da rede. Esse aspecto induz a uma hipótese que contrapõe alguns autores sob o aspecto de distanciamento máximo entre interseções, que consideram 500m e por vezes 300m, como o limite superior de influência em interseções adjacentes. Esse estudo não é objetivo deste trabalho, e fica como sugestão para estudos futuros.

As redes com espaçamento variável entre as interseções apresentaram respostas variadas. No entanto, ficou visível a influência do espaçamento no desempenho do tráfego, pois, nos trechos em que as distâncias entre as interseções foram menores, observou-se a redução das medidas de atraso médio.

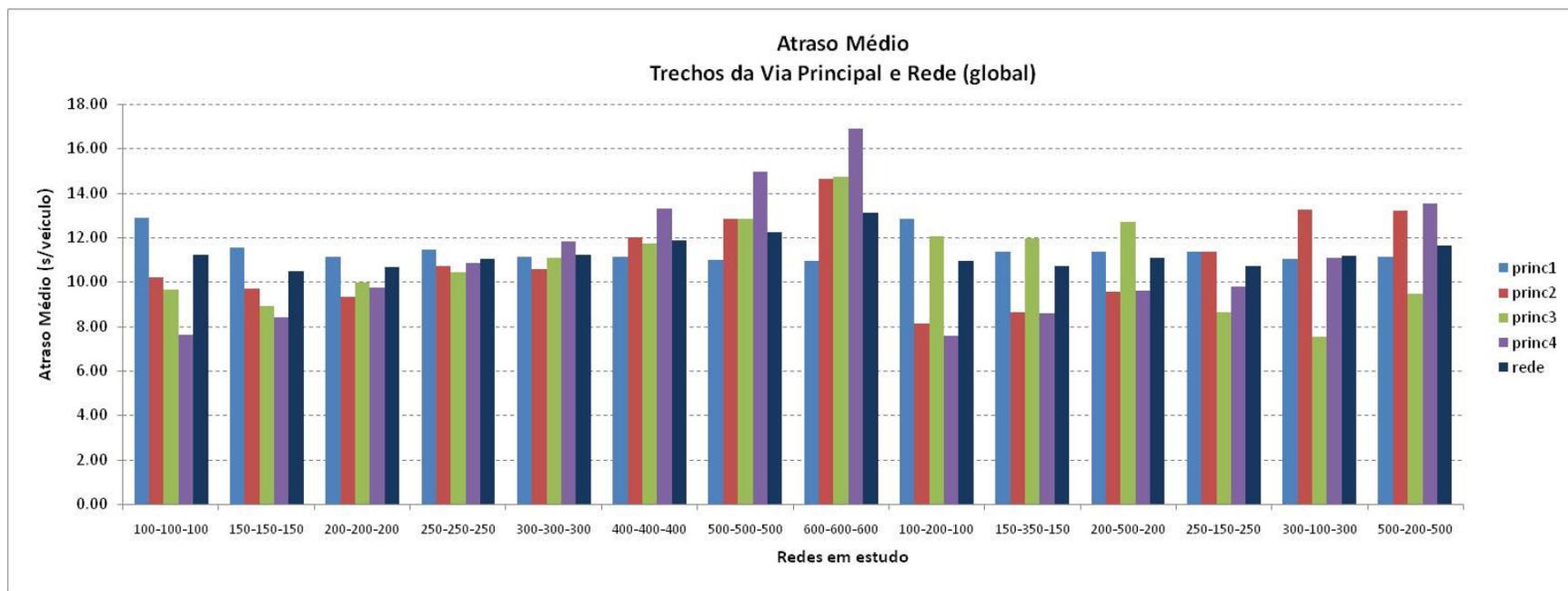


Figura 4.2 Atraso Média da via principal relativas ao pré-estudo de espaçamento entre interseções da rede de estudo

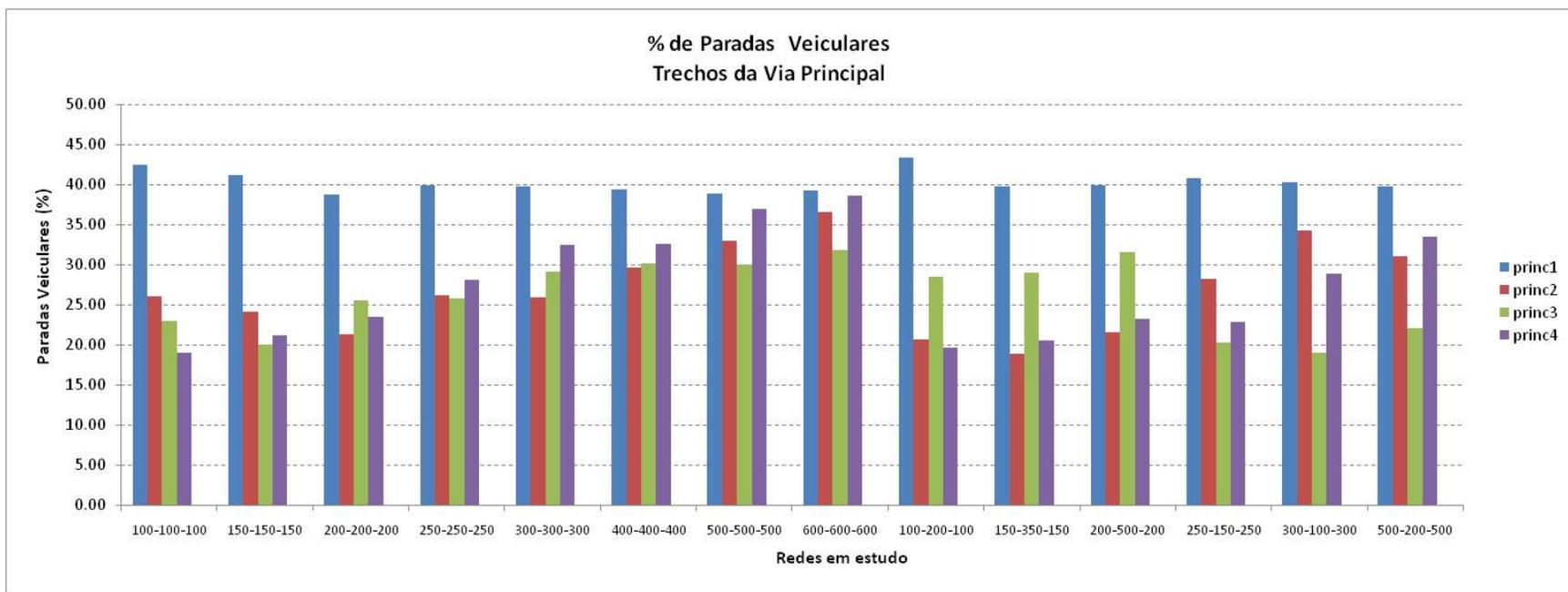


Figura 4.3 Percentual de paradas veiculares para a via principal relativas ao pré-estudo de espaçamento entre interseções da rede de estudo

Em termos de paradas veiculares, a rede com espaçamento de 100m foi a que apresentou os resultados mais característicos de operação em rede, além dos melhores valores para medidas de desempenho. Nesse caso é importante ressaltar que a área de avaliação do controlador *fuzzy* utilizado neste estudo é de 100m à montante da interseção. Sendo assim, todos os veículos que estão em circulação num sistema com espaçamento de 100m estão sendo considerado na inferência *fuzzy*. À medida que as distâncias entre as interseções aumentam, as paradas veiculares também aumentam, passando inclusive pelos limites considerados na literatura como distanciamentos sem influência de interseções adjacentes (300m e 500m). Para 500m e 600m, as paradas veiculares possuem valores próximos aos valores observados para a primeira interseção. No entanto, é necessária a realização de testes estatísticos para a verificação da significância desta diferença. Novamente, um aspecto que não é contemplado nos objetivos deste trabalho, e fica como sugestão para estudos futuros.

Assim como verificado para o atraso médio nas configurações de rede com distanciamentos variados, as paradas veiculares também apresentaram resultados variados com grande redução desta medida para os menores trechos da rede.

Por fim, em função do que foi observado no pré-teste realizado, somado à experiência apresentada por Niittymäki (1999), foram definidas quatro configurações de rede para subsidiar os estudos deste capítulo: (1) rede 111 (100m-100m-100m), (2) rede 333 (300m-300m-300m), (3) rede 313 (300m-100m-300m) e (4) rede 131 (150m-350m-150m).

Controle semafórico

Uma vez que a rede opera em sentido único de tráfego e não são permitidos movimentos de conversão (Figura 4.4), o controle semafórico é do tipo bifásico.

Como o estudo abrange dois tipos de controladores semafóricos, o detalhamento relativo às características particulares de cada um deve ser feito em separado: (a) controlador por tempo fixo e (b) controlador *fuzzy*.

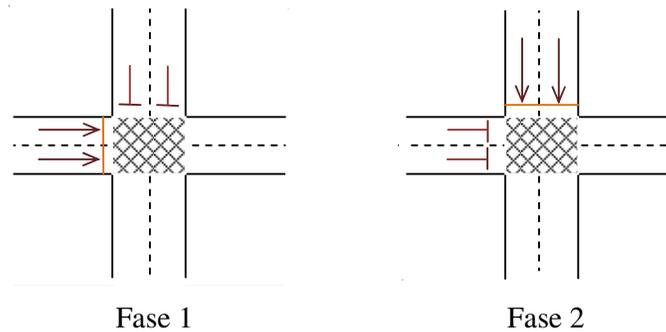


Figura 4.4 Movimentos das duas fases semafóricas

(a) Controlador semafórico por tempo fixo

A determinação dos tempos de ciclos e das frações de verde para o controle por tempo fixo utilizado neste trabalho foi feita utilizando os métodos de Webster e do Grau de Saturação Crítico, conforme apresentado no Apêndice B deste documento. Os tempos semafóricos obtidos são apresentados, por volume de tráfego, na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 Síntese da programação semafórica por nível de volume

Nível de Volume	Volume Médio		EV	T_{AM}	VG	T	Ciclo	Verde Efetivo		X	
	Princ.	Sec.						Princ.	Sec.	Princ.	Sec.
Alto	2.200	660	5	4	1	10	95	65	20	0,89	0,87
Médio	1.600	500	5	4	1	10	52	32	10	0,72	0,72
Baixo	1.200	400	5	4	1	10	50	30	10	0,50	0,50

Em que,

- Volume é dado em veículos/hora.
- Entre Verdes (EV), Amarelo (T_{AM}), Vermelho Geral (VG), Tempo Perdido (T), Ciclo e Verde Efetivo, são dados em segundos.
- Grau de Saturação (X)

Os tempos semafóricos apresentados foram calculados para a operação isolada do tráfego. Eles foram inseridos assim no simulador, no entanto de modo coordenado, ou seja, considerando as defasagens em relação ao primeiro semáforo da rede à montante. As defasagens foram calculadas utilizando o diagrama Espaço \times Tempo. O uso de métodos mais elaborados para o estabelecimento da defasagem, tal como a

maximização de banda de verde, são desnecessários em função da simplicidade da rede em questão.

As defasagens utilizadas nas simulações são apresentadas na Tabela 4.9 por configuração de rede.

Tabela 4.9 Defasagens dadas em relação à interseção 1, para as configurações de rede

Rede	Defasagens para $v=50 \text{ km/h}$		
	1-2	2-3	3-4
111	7.2	14.4	21.6
333	21.6	43.2	64.8
313	21.6	28.8	50.4
131	10.8	36.0	46.8

(b) *Controlador semafórico atuado do tipo fuzzy*

As definições dos elementos *fuzzy* do controlador utilizado neste estudo são descritas no item 3.14 deste documento (Controlador 2).

A operação do Controlador 2 neste estudo é caracterizada conforme apresentado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 Caracterização da operação do Controlador Semafórico *Fuzzy*

Caracterização da operação	
Tempo mínimo de verde	10s
Tempo de amarelo	4s
Vermelho geral	1s
Número Máximo de extensões	5
Tempo mínimo da extensão	2s

Para o controle *fuzzy* foi utilizado um detector de tráfego para cada aproximação, localizado a 100m da linha de retenção. Essa definição tem um significado físico para o controle, ou seja, ela delimita a área de controle do controlador *fuzzy*. Nesta área é realizada a leitura do número de veículos que seriam atendidos se o tempo de verde durasse mais “x” segundos, sendo que $x = 100/v$ (v = velocidade operacional em m/s). Para a velocidade utilizada (50km/h) o tempo de aproximação é de 7s.

Como pode ser observado na tabela de extensões *fuzzy* do Controlador 2 (Tabela A.2, no Apêndice A), a extensão máxima de verde dada é de 9 segundos. Assim, o tempo de ciclo máximo possível pode ser calculado:

$$\text{ciclo máximo} = 2 \times (\text{tempo mínimo de verde} + (\text{ext máx} \times \text{n.º de extensões})) + \text{entreverdes}$$

$$2 \times (10 + (9 \times 5)) + 10 = 120s$$

Assim, o tempo de ciclo deste controlador está dentro do limite máximo (120s) recomendável na literatura (Roess *et al.*, 2004, DENATRAN, 1984).

4.2 SIMULAÇÕES

O presente estudo propõe uma exploração acerca dos impactos decorrentes de variações de elementos relacionados à operação do tráfego (são eles: a configuração da rede, o nível de volume e o tipo de geração do volume veicular) no controle semafórico *fuzzy* operando em rede aberta. Os elementos considerados para as análises relacionadas ao desempenho do controlador *fuzzy* neste tipo de operação, o controle por tempo fixo operando em modo coordenado é utilizado como referência. É adequada a sua utilização para esta finalidade uma vez que quando a programação semafórica por tempo fixo é feita adequadamente para uma situação de tráfego bem definida, este controle deve produzir um nível de controle de alta qualidade para pequenas variações randômicas na geração de veículos.

Conforme apresentado na seção de definição dos elementos dos modelos de simulação, as variáveis que constam desse estudo são: tipo de controlador (*tempo fixo e fuzzy*), tipo de volume (*volume veicular médio médio e volume veicular médio variável*), nível de volume (*alto, médio e baixo*) e rede (*111, 333, 131 e 313*) (Tabela 4.11).

Tabela 4.11 Resumo das variáveis de simulação

Modo de controle	Tipo de Volume	Nível de Volume⁽¹⁾	Rede
Tempo fixo-coordenado	Médio	Alto = 2.200 x 660	111
Atuado tipo <i>Fuzzy</i>	Variável	Médio = 1.600 x 500	333
-	-	Baixo = 1.200 x 400	131
-	-	-	313

⁽¹⁾ Volume em *vph*.

O estudo prevê a realização de testes de significância estatística, sendo assim, foram utilizadas trinta horas independentes de simulação para cada situação proposta, por exemplo, *Fuzzy-VVM médio-Vol.Alto-III* (Hair Jr et al., 2009).

No sentido de viabilizar a replicação dos resultados obtidos pelas simulações é apresentado na Tabela 4.12 o conjunto de sementes utilizadas na inicialização das simulações realizadas no UnB-Sitracs.

Tabela 4.12 Conjunto de sementes de inicialização das 30 horas de simulação

Hora	Semente	Hora	Semente
H-1	1218198787225	H-16	1242759568437
H-2	1218198827083	H-17	1242759669703
H-3	1218198969295	H-18	1242759723171
H-4	1218199003366	H-19	1244642711234
H-5	1218199074252	H-20	1244642729671
H-6	1242758918812	H-21	1244642748421
H-7	1242758965109	H-22	1244642824328
H-8	1242759011968	H-23	1244642842703
H-9	1242759049062	H-24	1244642899187
H-10	1242759089015	H-25	1244642917078
H-11	1242759235218	H-26	1244642935296
H-12	1242759322234	H-27	1244642971468
H-13	1242759362984	H-28	1244643009453
H-14	1242759479593	H-29	1244643028796
H-15	1242759525546	H-30	1244643047515

Das medidas de desempenho disponíveis pelo simulador utilizado foi selecionados para as análises o atraso médio, o percentual de paradas veiculares, o número médio de paradas por veículo e o tempo de verde médio.

4.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises dos resultados foram realizadas sob três aspectos principais, tendo início em uma análise global da rede com vistas a avaliar os impactos das alterações propostas na rede como um todo; seguindo por uma análise por tipo de via, com o objetivo principal de verificar os efeitos de modo global na via arterial; e por fim um grupo de análises para os resultados obtidos de cada interseção que compõe a rede, com o propósito de verificar, especialmente, o efeito progressivo ao longo do trecho arterial da rede. Para tanto, as

análises contemplam avaliações descritivas dos valores médios das medidas de desempenho utilizadas e testes de significância estatística para avaliação das diferenças observadas.

A análise descritiva contempla análises gráficas de cunho comparativo através de diagramas de barras verticais construídos a partir de valores médios obtidos para as trinta horas de simulação consideradas.

Os testes de significância definidos inicialmente para o estudo foram a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey, no entanto a utilização destes testes prevê a normalidade dos grupos (amostras) e a homogeneidade das variâncias dos grupos comparados. Em caso de não atendimento das premissas de utilização destes testes, que são paramétricos, foram aplicados os testes não-paramétricos correspondentes, ou seja, Wilcoxon, para análise de 2 grupos e Kruskal-Wallis, para análise de 2 ou mais grupos.

A verificação da normalidade dos grupos de dados foi feita mediante a aplicação de quatro testes: Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises e Anderson-Darling. Para o estudo um grupo não é considerado “*normal*” se dois testes, ou mais, apontarem diferenças significativas. Nesse caso os testes subsequentes são do tipo não-paramétrico. Os grupos que atenderam ao teste de normalidade devem ser submetidos à verificação da homogeneidade das suas variâncias através do teste de Levene. Em caso afirmativo os testes seguintes são paramétricos (ANOVA e Tukey), caso contrário, os testes não-paramétricos completam o estudo (Wilcoxon e Kruskal-Wallis). Todos os testes estatísticos foram realizados mediante a utilização do *software SAS*[®] (*Statistical Analysis System*), com o suporte do Departamento de Estatística da UnB.

4.3.1 Análise Global

Esta etapa aborda o estudo da rede como um todo, ou seja, as medidas de desempenho aqui utilizadas são medidas globais da operação da rede. Os objetivos destas análises contemplam (a) a verificação do efeito da utilização de volume veicular médio variável ao longo da hora de simulação, denominado no estudo como “Volume Veicular Médio variável” (*VVMv*), frente ao modo convencional de análises de simulação, que utiliza o volume médio horário (“Volume Veicular Médio médio” ou *VVMm*); (b) a comparação das medidas de desempenho obtidas pelo controle realizado através da operação atuada com um controlador *fuzzy* projetado para a operação isolada disposto em rede e pelo controle

tradicional por tempo fixo-coordenado para cada estrutura de rede em estudo; e (c) a verificação da influência da estrutura da rede no desempenho do tráfego sob o controle atuado do tipo *fuzzy*.

a) *Análise 1: Volume Veicular Médio Médio x Volume Veicular Médio Variável*

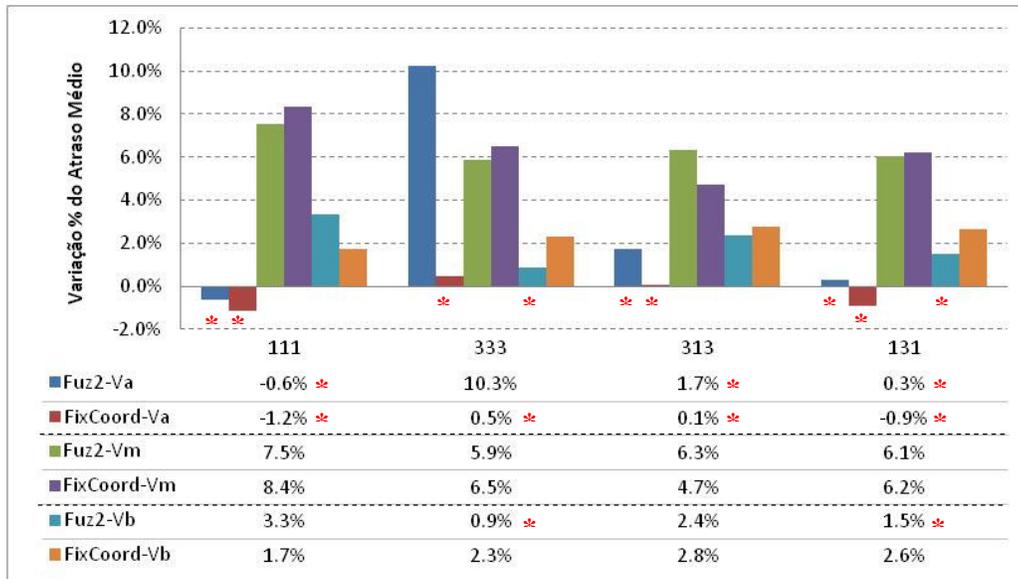
- *Atraso médio na rede*

A Figura 4.5 traz as diferenças percentuais dos atrasos médios globais obtidos para o *VVMv* em relação ao *VVMm*. Tais diferenças foram obtidas de acordo com a formulação apresentada na Equação 4.2.

$$DiferençaPercentual(AM) = \frac{(AM_VVMv - AM_VVMm)}{AM_VVMm} \times 100\% \quad \text{Eq. 4.2}$$

As simulações realizadas com *VVMv* resultaram, em sua maioria, em atrasos maiores que os obtidos com o *VVMm* (Figura 4.5).

A redução do atraso de *VVMv* em relação a *VVMm* (valores negativos) foi observada em apenas em um caso do controle *fuzzy* (111-VA), e em dois casos do controle por tempo fixo (111-VA e 131-VA). Tanto para o volume alto quanto para o volume baixo os resultados apresentaram diferenças pequenas, salvo o resultado do controle *fuzzy* e volume alto da rede 333 (333-VA), que apresentou a maior diferença do experimento. Este resultado foi o único que apresentou diferença significativa ($p = 0,0127$) para o volume alto (Tabela 4.13). Para os demais casos as diferenças permaneceram iguais ou abaixo a aproximadamente 3%. Mesmo tendo observado diferenças pequenas para o volume baixo, apenas dois casos apresentaram diferenças não-significativas (333-VB e 131-VB). Já para o volume médio as diferenças foram mais expressivas quando comparadas aos resultados dos volumes alto e baixo, sendo que a menor diferença é de 4,7%. Os testes realizados para os atrasos obtidos com o volume médio apontaram diferenças significativas para todos os casos simulados (Tabela 4.13), sendo estas em geral superiores para o caso do controle por tempo fixo, como esperado.



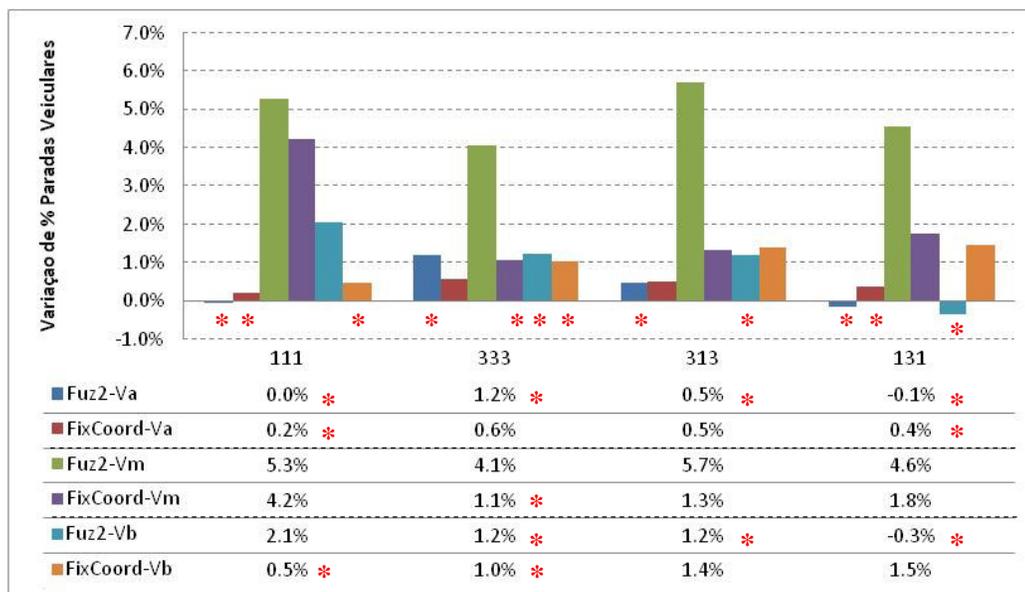
* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.13)

Figura 4.5 Variação percentual dos atrasos médios globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede

No caso dos volumes altos e baixos, as diferenças observadas sob a forma de controle fixo-coordenado são superiores às obtidas com o controle *fuzzy* em 5 das 8 situações analisadas.

- *Percentual de Paradas Veiculares*

As variações percentuais de $VVMv$ em relação ao $VVMm$ para o “*percentual de paradas veiculares*” foram menores que as obtidas para “*atraso médio*”, no entanto, o padrão observado de resultados mais expressivos para o volume médio, e em sua maioria com diferenças estatisticamente significativas, foi mantido. Novamente foram observadas apenas duas situações de redução da medida de desempenho em questão para a análise do tipo de volume (131-Fuz2-VA e 131-Fuz2-VB) (Figura 4.6).



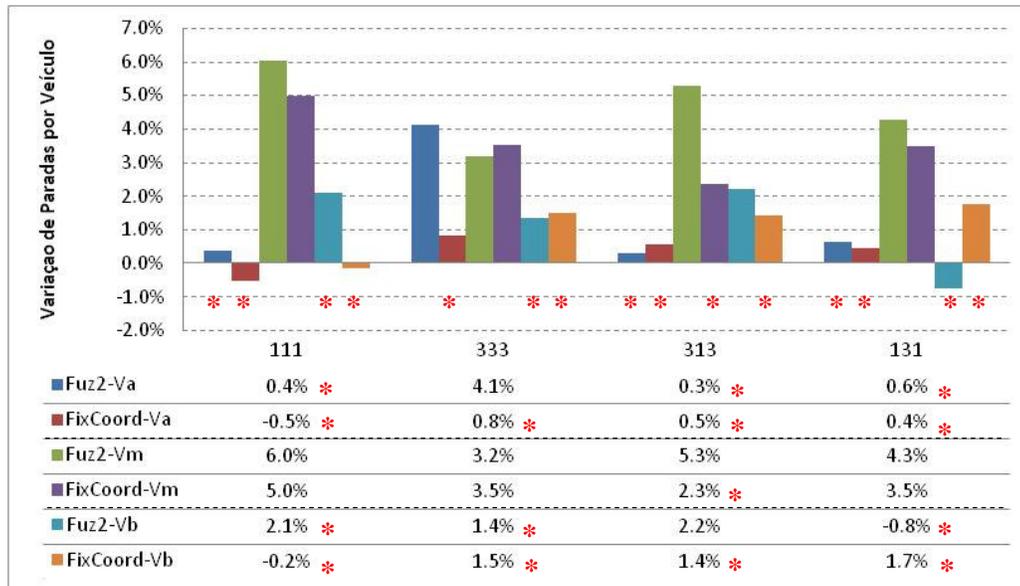
* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.13)

Figura 4.6 Variação percentual dos percentuais de paradas veiculares globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede

Com relação às diferenças observadas para o controle fixo-coordenado e para o controle *fuzzy*, verifica-se que elas são mais elevadas para o controle *fuzzy*.

- *Paradas por veículo*

Seguindo o mesmo padrão observado para as demais medidas de desempenho, a diferença percentual do “*número de paradas por veículos*” apresentou valores baixos (até 2%) para os volumes alto e baixo, e em sua maioria, não significativos estatisticamente (Tabela 4.13). Para o volume médio os resultados foram mais expressivos, variando de 2% a 6%. Também nesse caso, as diferenças observadas foram maiores para o controle *fuzzy*.



* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.13)

Figura 4.7 Variação percentual das paradas por veículo globais obtidos para o Volume Veicular Médio variável ($VVMv$) em relação ao Volume Veicular Médio médio ($VVMm$), para cada configuração de rede

Tabela 4.13 Valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Wilcoxon para verificação da significância das diferenças das medidas de desempenho obtidas para o Volume Veicular Médio Médio e Volume Veicular Médio Variável

Rede/Volume		Fuz2			FixCoor		
		AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
111	Alto	0,7004	0,9802	0,5645 *	0,4644	0,1983 *	0,7581
	Médio	0,0001 *	0,0001	0,0004 *	0,0001 *	0,0001	0,0005 *
	Baixo	0,0095 *	0,0157	0,1273 *	0,0399 *	0,3351	0,8122 *
333	Alto	0,0127 *	0,1113	0,0137 *	0,8399	0,0129	0,6419
	Médio	0,0008 *	0,0004 *	0,0122 *	0,0413 *	0,0583	0,0481 *
	Baixo	0,4758	0,1410	0,2298 *	0,0358	0,0669	0,1056 *
313	Alto	0,7227 *	0,2057	0,8399	0,7227 *	0,0378	0,7202
	Médio	0,0002 *	0,0001 *	0,0001 *	0,0058 *	0,0366	0,0550 *
	Baixo	0,0250	0,0905 *	0,024 *	0,0108	0,0149	0,1479 *
131	Alto	0,9242	0,8201	0,7710 *	0,6510	0,1634	0,8227
	Médio	0,0001	0,0001	0,0005 *	0,0014	0,0082	0,0084 *
	Baixo	0,2247	0,6599	0,4327 *	0,0151	0,0111	0,0569 *

* valores de p para o teste de Wilcoxon.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença entre os resultados para $VVMv$ e $VVMm$ é significativa.

A medida de desempenho “*paradas por veículo*” apresentou a maior ocorrência de diferenças não-significativas para as duas formas de volume veicular testadas nas simulações. No entanto, assim como ocorreu para o “*atraso médio*” e para o “*percentual de paradas veiculares*”, as variações para o volume médio foram altas e, em sua maioria, estatisticamente significativas. Já o “*atraso médio*” foi a medida de desempenho mais sensível às alternativas de volume veicular (VVMv e VVMm), visto que apenas 9 casos (37,5%) dos 24 testados apresentaram diferenças não significativas. Esse número é baixo quando comparado aos 12 (50%) e aos 15 (62,5%) casos de “*percentual de paradas veiculares*” e “*paradas por veículo*”, respectivamente.

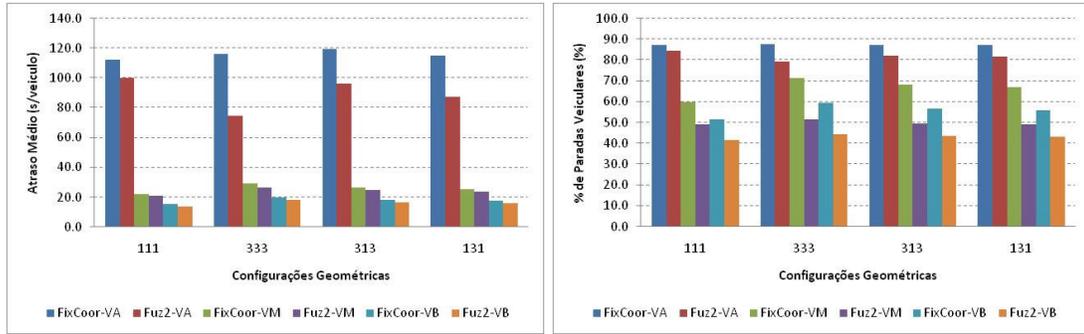
A avaliação aqui apresentada acerca do impacto da utilização de Volumes Veiculares Médios médio ou variável ao longo da hora de simulação tem o propósito de confirmar que a utilização de dados volumétricos mais detalhados (variável ao longo da hora) pode impactar nos resultados de simulação. Visto que é uma representação mais próxima da operação do tráfego em campo, pois como já mencionado em Roess *et al.* (2004), na operação em campo ocorrem variações mais amplas ao longo da hora que as resultantes da aleatoriedade do simulador sobre o volume médio considerado. Recomenda-se a realização de estudos complementares acerca das vantagens da utilização do volume veicular médio variável nas simulações para que seja justificado o esforço na obtenção desses dados.

Ainda que tenha sido observada a ocorrência de diferenças significativas para resultados obtidos com volume médio e volume variável, as análises seguintes são realizadas contemplando apenas o Volume Veicular Médio médio, que é tradicionalmente utilizado nos estudos de simulação.

b) Análise 2: Modo de controle

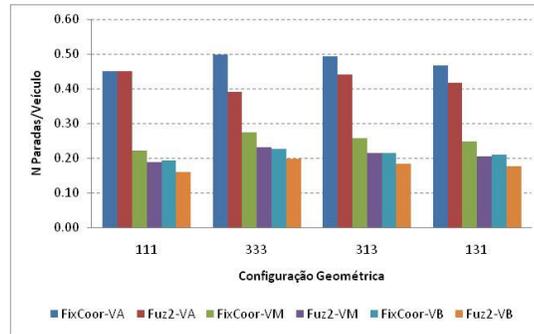
A avaliação do desempenho do tráfego na operação em rede aberta proposta no estudo é feita através da análise comparativa das medidas de desempenho obtidas para a operação sob os dois modos de controle semafórico.

A Figura 4.8 traz a representação gráfica dos valores médios das medidas de desempenho analisadas, tornando factível a observação da superioridade do controlador *fuzzy* sobre o controle por tempo fixo, para todas as situações testadas nas simulações deste estudo.



(a) Atraso Médio

(b) % de Paradas Veiculares



(b) Número de Paradas por Veículo

Legenda:

- Fixo-Coordenado, Vol. Alto
- Fuzzy, Vol. Alto
- Fixo-Coordenado, Vol. Médio
- Fuzzy, Vol. Médio
- Fixo-Coordenado, Vol. Baixo
- Fuzzy, Vol. Baixo

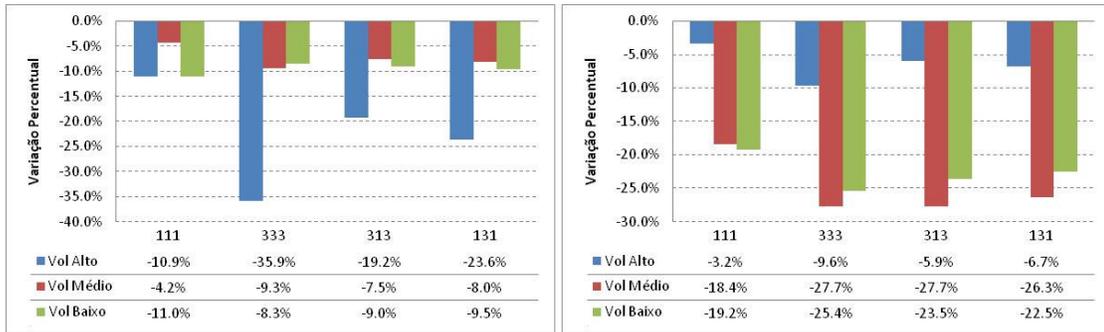
Figura 4.8 Valores médios para as medidas de desempenho obtidos para os modos de controle Fixo-coordenado e *Fuzzy*, volumes alto, médio e baixo, para cada configuração de rede

A análise da diferença percentual das medidas de desempenho obtidas para o controle *fuzzy* em relação ao controle por tempo fixo-coordenado (Equações 4.3, 4.4 e 4.5), associada às análises de significância estatística (Tabela 4.14), trazem a comprovação das vantagens, em termos globais, para a operação em rede dos casos em estudo sob o controle *fuzzy*.

$$DifPercentual(\%PV) = \frac{(\%PV_VVMm_Fuzzy - \%PV_VVMm_Fixo)}{\%PV_VVMm_Fixo} \times 100\% \quad \text{Eq. 4.3}$$

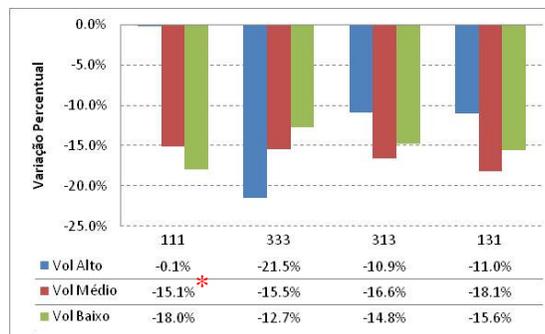
$$DifPercentual(Par/V) = \frac{(Par/V_VVMm_Fuzzy - Par/V_VVMm_Fixo)}{Par/V_VVMm_Fixo} \times 100\% \text{ Eq. 4.4}$$

$$DifPercentual(AM) = \frac{(AM_VVMm_Fuzzy - AM_VVMm_Fixo)}{AM_VVMm_Fixo} \times 100\% \text{ Eq. 4.5}$$



(a) Atraso Médio

(b) % de Paradas Veiculares



* Diferença não-significativa

(c) Paradas por Veículo

Figura 4.9 Diferença Percentual entre as medidas de desempenho obtidas para o controle *Fuzzy* e o controle Fixo-coordenado

Pelas representações gráficas é possível observar que o desempenho do tráfego para a rede é similar para os dois modos de controle com valores médios significativamente menores (salvo para “paradas por veículo”, Volume alto, Rede 111) para a operação sob o controlador *fuzzy*.

O atraso médio apresentou as maiores diferenças percentuais entre os dois modos de controle, para o volume alto, chegando à aproximadamente 36%. Para os volumes médio e

baixo as diferenças foram mantidas de 4% a 11%. Porém, as diferenças observadas para o “*atraso médio*” foram todas estatisticamente significativas.

O “*percentual de paradas veiculares*” apresentou diferenças consideráveis entre os modos de controle para os volumes médio e baixo (aproximadamente 28%), enquanto que a diferença máxima observada para o volume alto foi de 9,6%.

As “*paradas por veículo*” apresentaram diferenças relativamente homogêneas para as quatro configurações de rede, especialmente para os volumes médio e baixo. O volume alto apresentou padrões bem diferenciados desta medida para cada configuração de rede testada, em especial, a rede 111 que apresentou uma diferença de 0,1%, e que foi o único resultado não estatisticamente significativo deste estudo.

Tabela 4.14 Valores de p para os testes ANOVA e Wilcoxon, para verificação entre os modos de controle *Fuzzy* e Fixo-coordenado

Rede/Volume	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
111	Alto	<.0001	<.0001 *
	Médio	0.0191 *	<.0001 *
	Baixo	<.0001 *	<.0001 *
333	Alto	<.0001 *	<.0001 *
	Médio	<.0001 *	<.0001 *
	Baixo	<.0001	<.0001 *
313	Alto	<.0001 *	<.0001 *
	Médio	<.0001 *	<.0001 *
	Baixo	<.0001	<.0001 *
131	Alto	<.0001	<.0001 *
	Médio	<.0001	<.0001 *
	Baixo	<.0001	<.0001 *

* valores de p para o teste de Wilcoxon.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa.

Ainda que o controlador *fuzzy* testado nesse estudo não tenha sido desenvolvido para a operação em rede, seu desempenho global nesta operação apresentou resultados melhores, em maior ou menor grau, em relação ao controle por tempo fixo em modo coordenado, ou seja, um modo de controle projetado para a operação da rede testada.

Um aspecto relevante nos testes realizados vem da comprovação das diferenças estatisticamente significativas, ou seja, os benefícios observados no desempenho do tráfego

não são eventualidades, mas um resultado consistente estatisticamente, sob um nível de significância de 5%.

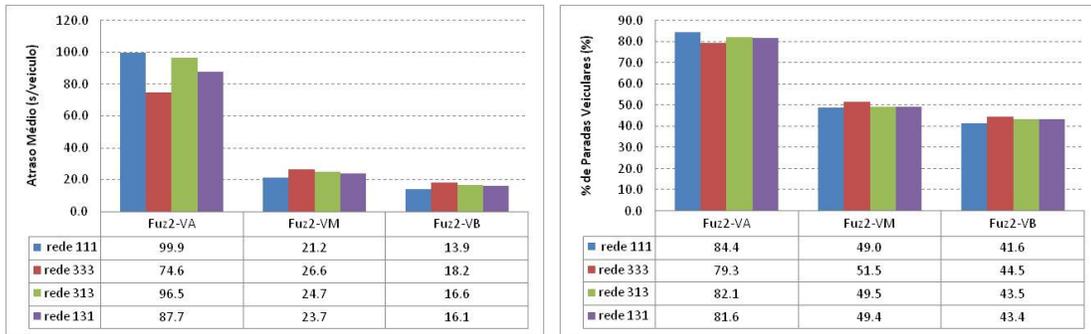
c) Análise 3: Configuração da rede

A análise global do sistema sob o controle *fuzzy* em função da estrutura da rede, ou seja, em função dos espaçamentos entre as interseções que a compõem, é adequada devido aos possíveis efeitos causados pelos pelotões das interseções à montante ao longo da rede. Esse fenômeno pode impactar no desempenho global da rede, tanto positiva, quando esse pelotão consegue passar pela interseção seguinte com um mínimo de paradas; quanto negativamente, quando a maior parte do pelotão pára na interseção seguinte, causando grande aumento nos atrasos na rede.

Para verificar o desempenho da rede de modo global é apresentado na Figura 4.10 o conjunto de diagramas de barras dos valores médios das medidas de desempenho obtidas das simulações para as redes em estudo.

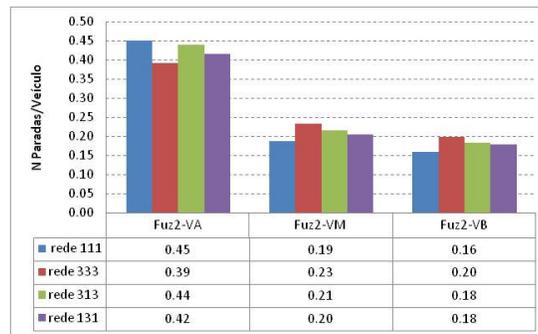
O padrão dos resultados das medidas de desempenho obtidas para os volumes médio e baixo foram similares para cada configuração de rede, ou seja, tanto para o volume médio como para o volume baixo os valores das três medidas de desempenho da rede 111 foram os menores, seguidos da rede 131, 313 e por último da rede 333. Já para o volume alto a rede 111 apresentou os piores resultados para todas as medidas de desempenho, e a rede 333 os melhores.

O volume alto testado na operação da rede 111, ou seja, com interseções espaçada de 100m, pode causar fila excedente nos pequenos *links* ao longo da rede e comprometer a fluidez dos *links* à montante, o que explica o desempenho desta rede para esse volume ter sido o inverso do observado para a mesma rede nos demais volumes veiculares testados (médio e baixo). Nos volumes médio e baixo a saída do pelotão não é densa o suficiente para saturar os *links* subsequentes da rede. É relevante lembrar que as medidas em estudo nessa seção não consideram apenas a operação da via arterial, mas da rede como um todo que é composta, também, das aproximações dos tramos secundários. As análises específicas por tipo de via são relevantes para a compreensão da dinâmica de funcionamento da rede sob a operação de controladores *fuzzy*, e é tratada na seção seguinte a esta.



(a) Atraso Médio

(b) % de Paradas Veiculares



(c) Paradas por Veículo

Figura 4.10 Valores médios para as medidas de desempenho obtidos para o controle *Fuzzy*; volumes alto, médio e baixo, para cada configuração de rede

Os testes de significância estatística realizados para as quatro configurações de rede simultaneamente (Tabela 4.15) confirmam que as diferenças observadas nos valores médios por volume, para as quatro configurações de rede, são estatisticamente significativas.

Tabela 4.15 Valores de p para os testes ANOVA e Kruskal-Wallis, para verificação da significância estatística da diferença entre as redes, para medidas globais sob o controle

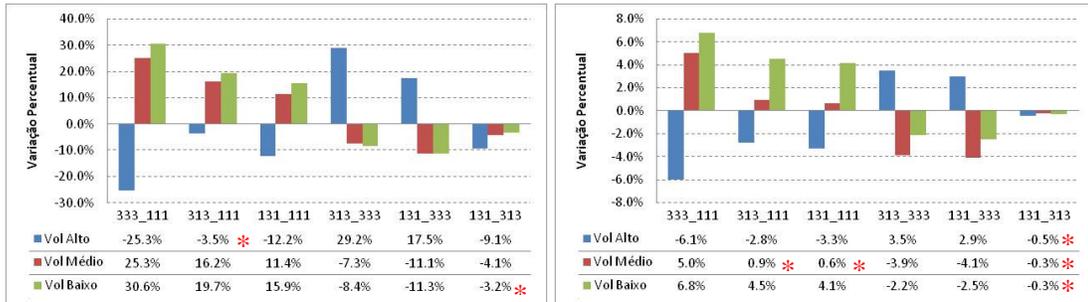
fuzzy

Volume	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
Alto	<.0001 *	<.0001 *	<.0001 *
Médio	<.0001	<.0001	<.0001 *
Baixo	<.0001	<.0001	<.0001 *

* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa.

Diante deste resultado foi considerada a verificação da significância estatística por pares de redes, uma vez que os testes realizados para todo o conjunto, por volume (Tabela 4.15), não permite identificar quais redes diferem entre si, mas sim se pelo menos uma das redes difere estatisticamente das demais.

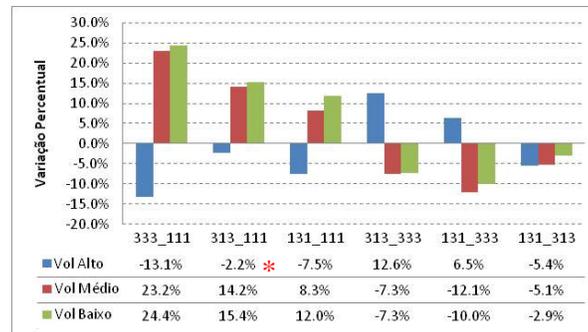


* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.16)

* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.16)

(a) Atraso Médio

(b) % de Paradas Veiculares



* Diferenças não-significativas (ver Tabela 4.16)

(c) Paradas por Veículo

Figura 4.11 Diferença Percentual das medidas de desempenho obtidas para cada par de configurações de rede, sob controle *Fuzzy*

Essa verificação para os pares de redes foi realizada através da aplicação dos testes de Tukey (paramétrico – utilizado para os grupos que atendem a normalidade e homogeneidade da variância) e de Wilcoxon (não-paramétrico, para verificação de dois grupos – utilizado para os grupos que não passaram pelo teste de normalidade ou da homogeneidade das variâncias). A Tabela 4.16 apresenta os resultados em termos classificatórios, ou seja, as redes identificadas com as mesmas letras (A, B, C ou D) não são estatisticamente diferentes entre si, ao nível de significância de 5%. Os resultados são dispostos em ordem decrescente relativo ao valor da medida de desempenho em análise.

Tabela 4.16 Diferenças entre os pares de redes

Atraso Médio				Atraso Médio				Atraso Médio			
Volume Alto*				Volume Médio				Volume Baixo			
Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad
A	111	99.91	6.78	A	333	26.61	1.29	A	333	18.15	0.90
A	313	96.46	11.22	B	313	24.68	1.26	B	313	16.64	0.69
B	131	87.71	11.40	C	131	23.66	1.34	B	131	16.11	0.80
C	333	74.64	11.12	D	111	21.24	1.31	C	111	13.90	0.75

% Paradas Veiculares				% Paradas Veiculares				% Paradas Veiculares			
Volume Alto*				Volume Médio				Volume Baixo			
Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad
A	111	84.44	0.92	A	333	51.49	1.56	A	333	44.47	1.38
B	313	82.06	1.30	B	313	49.49	1.94	B	313	43.51	1.41
B	131	81.65	2.13	B	131	49.36	1.92	B	131	43.36	1.13
C	333	79.33	2.46	B	111	49.05	1.58	C	111	41.65	1.33

Paradas por Veículo				Paradas por Veículo				Paradas por Veículo			
Volume Alto*				Volume Médio*				Volume Baixo*			
Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad	Class.	Rede	Média	DesvPad
A	111	0.45	0.03	A	333	0.23	0.01	A	333	0.20	0.01
A	313	0.44	0.03	B	313	0.21	0.01	B	313	0.18	0.01
B	131	0.42	0.03	C	131	0.20	0.01	C	131	0.18	0.01
C	333	0.39	0.02	D	111	0.19	0.01	D	111	0.16	0.01

* Teste de Wilcoxon

Embora para os três níveis de volume das redes com distanciamento alternado (131 e 313) tenham apresentado resultados estatisticamente iguais para o “% de paradas veiculares”, essa constatação não deve ser tomada por regra. É adequado realizar testes com um número maior de estruturas de redes com padrões geométricos similares, ou seja, com distanciamento variável entre as interseções.

Para a medida de desempenho “atraso médio”, as redes apresentaram casos isolados de igualdade estatística (redes 111 e 131, para volume alto e redes 313 e 131 para o volume baixo), assim como para o “% de paradas veiculares” (313 e 131, volume alto; 313, 131 e 111, volume médio e 313 e 131 para o volume baixo), e para as “paradas por veículo” (111 e 313, volume alto). Os resultados obtidos evidenciam que, de modo geral, a distância entre as interseções impacta de modo significativo na operação do tráfego da rede. Ou seja,

é recomendável a utilização de recursos para a operação em rede dos controladores que considerem o distanciamento das interseções adjacentes.

Por fim, os resultados apresentados na Análise 3 comprovam a interação do volume veicular e da estrutura da rede no desempenho do tráfego em uma rede aberta sob a operação de controladores semafóricos *fuzzy*.

A análise global da rede nada pode dizer acerca da progressão ao longo da rede, mas sim sobre o desempenho global do sistema sob controle. Essa análise só pode ser realizada para avaliação feita por tipo de via separadamente.

4.3.2 Análise por tipo de via

Nesta etapa da pesquisa as análises são realizadas para as medidas de desempenho agrupadas por tipo de via, ou seja, média ponderada para os resultados obtidos para as aproximações da via arterial e para as aproximações de vias secundárias. O objetivo desta análise é verificar os impactos no desempenho do tráfego e na resposta do controlador em função do modo de controle empregado e em função da estrutura da rede simulada, para cada tipo de via desta rede (arterial e secundária). Para tanto são realizadas análises descritivas utilizando diagramas de barras verticais construídos a partir de valores médios para as medidas de desempenho utilizadas, seguidas da verificação da significância estatística para as diferenças observadas.

a) Análise 1: Modo de controle

Os dados numéricos e gráficos utilizados para as análises descritivas desta seção são apresentados no Apêndice C (Figuras C-1, C-2, C-3 e C-4; Tabelas C-1, C-2, C-3 e C-4) deste documento.

Como pode ser observado nas Figuras C-1, C-2 e C-3, todas as medidas de desempenho do tráfego para o conjunto de vias secundárias apresentaram alguma redução quando a rede é operada com o controlador *fuzzy* em relação à operação por tempo fixo-coordenado. Deve ainda ser destacado que, para alguns casos de volume veicular e de estrutura de rede, o desempenho do tráfego na via arterial quando submetido ao controle por tempo fixo-coordenado foi melhor que sob a operação *fuzzy*. Essas diferenças, tanto da via arterial quanto do conjunto das aproximações secundárias são, em sua maioria, estatisticamente significativas (Tabela 4.18).

Ainda, observando os diagramas de barras (ver Figuras C-1 a C-4) conjuntamente com as diferenças percentuais das medidas de desempenho da via secundária em relação à via arterial (ver Tabelas C-1 a C-4), verifica-se que os resultados de atraso médio obtidos para o controle *fuzzy* foram sempre mais vantajosos para a via secundária quando comparados aos obtidos com o controle por tempo fixo-coordenado. Ou seja, quando o atraso médio sofreu um aumento da secundária em relação à principal, esse aumento foi sempre maior para o controle por tempo fixo-coordenado quando comparado ao controle *fuzzy*, como por exemplo, para volume baixo (Figura 4.12 e Tabela 4.17). Quando ocorreu uma redução do atraso médio da secundária em relação à arterial, essa foi sempre maior para o controle *fuzzy* (ver o resultado para volume alto na Figura C-1). Assim, ainda que os atrasos médios obtidos para a via arterial sob o controle *fuzzy* para os volumes médio e baixo tenham sido maiores que os obtidos para o controle por tempo fixo-coordenado, a grande redução dos atrasos observados para as aproximações secundárias compensam esse resultado inferior da via arterial de modo que o desempenho global da rede sob o controle *fuzzy* seja superior e, ainda, significativo estatisticamente, como já discutido na seção 4.3.1-b.

Especialmente para os volumes médio e baixo a diferença observada entre as medidas de desempenho das vias secundárias em relação à via arterial é bem mais expressiva para o controle por tempo fixo que a observada para o controle *fuzzy* (Tabela 4.17 e Figura 4.12). Ou seja, o prejuízo causado à via secundária é muito grande sob o controle por tempo fixo. Esse fato é reforçado quando se lembra de que na seção anterior foi comprovada a superioridade do controle *fuzzy* para a rede como um todo.

É relevante destacar nesta análise a tendência de equalizar o desempenho do tráfego arterial e secundário própria deste controlador *fuzzy* que, como já mencionado, foi desenvolvido para outra estratégia de controle: controle isolado. Ainda assim, em função da sua característica adaptativa, o atraso médio na operação em rede sob esse controle *fuzzy* é nas situações estudadas para o volume alto, menor do que o atraso observado nos dois tipos de via sob o controle por tempo fixo-coordenado. Todas as diferenças foram estatisticamente significativas (ver Tabela 4.18).

Para as situações de volumes médio e baixo, os resultados para as vias secundárias são sempre melhores sob o controle *fuzzy*, enquanto que para a via principal o controle por tempo fixo-coordenado foi apenas ligeiramente superior ao volume médio (máximo de

9,45% para a rede 111) e mais elevados no volume baixo (máximo de 30,59% para a rede 111).

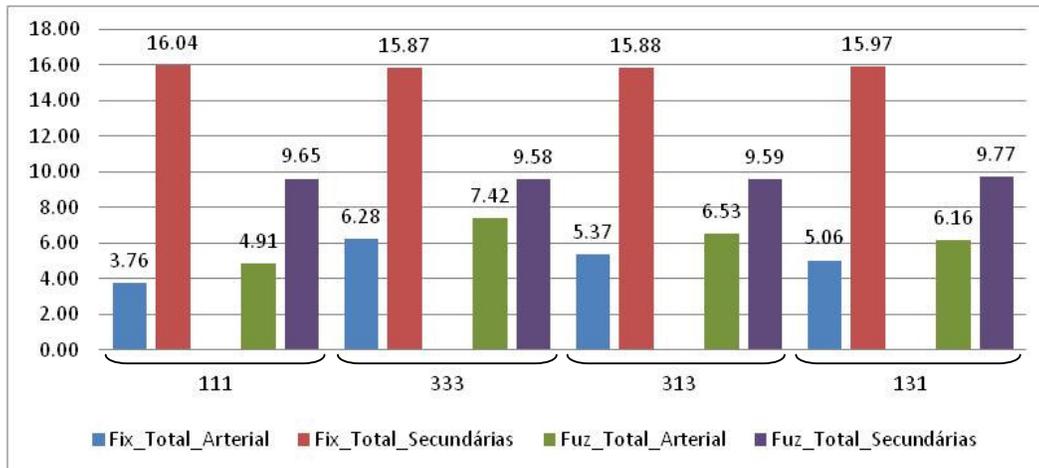


Figura 4.12 Atraso Médio para volume baixo, por tipo de via

Um outro aspecto que chama a atenção com relação ao “*atraso médio por veículo*” na via principal, é que o controle *fuzzy* apresentou os melhores resultados na comparação com o controle fixo-coordenado para a rede 333 e os piores para a rede 111, para os três níveis de volume estudados.

Tabela 4.17 Diferença percentual entre o atraso médio, para volume baixo, observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial

Rede	Fixo-Coordenado	Fuzzy
111	326.5%	96.8%
333	152.9%	29.2%
313	195.7%	47.0%
131	215.5%	58.6%

Assim como foi observado para o “*atraso médio*”, também para as demais medidas de desempenho do tráfego ficou evidente o efeito de reduzir os diferenças desse desempenho entre a via arterial e as secundárias causado pelo controlador *fuzzy* no controle em rede. Sempre que os valores das medidas de desempenho da via arterial aumentaram em relação ao controle por tempo fixo, a diferença percentual das medidas das aproximações secundárias em relação à via principal foi menor que as observadas para a rede sob o controle por tempo fixo. Porém, ainda assim, não foi observada a descaracterização do

controle arterial, ou seja, da mesma forma que para o controle fixo-coordenado ocorre o prejuízo da operação das vias arteriais quando comparadas à operação do corredor arterial, isso também é observado no desempenho da rede sob o controle *fuzzy*. Assim, devido à pequena perda de desempenho observada no controle da via arterial obtido pelo controle *fuzzy* em relação ao controle fixo-coordenado, justifica-se a busca de uma alternativa de “*cooperação*” da operação em rede para o controlador *fuzzy* para reduzir essa perda.

Com relação ao impacto da geometria da rede sobre as diferenças observadas no percentual de paradas veiculares e paradas por veículo na via principal sob os dois tipos de controle estudados verifica-se que a rede 333 e a rede 111 apresentaram, respectivamente, a maior e menor vantagem, para o volume alto. Para os volumes médio e baixo não foi possível identificar as redes que, consistentemente, indicassem a maior e a menor vantagem do uso do controle *fuzzy* em relação ao controle fixo-coordenado.

Quanto à resposta do controlador (Figura C-4) é relevante verificar que para a via arterial em todos os volumes e em todas as estruturas de rede, os tempos de verde dados pelo controlador *fuzzy* foram em média 35% menores que os apresentados pelo controle por tempo fixo. Para a via secundária a redução dos tempos de verde dados pelo controlador *fuzzy* foi ainda maior, na média de 45%. Para os volumes médio e baixo, a via arterial permaneceu com os tempos de verde reduzidos para o controle *fuzzy* em relação ao controle por tempo fixo, em média 22% para o volume médio e 42% para o volume baixo. As vias secundárias destes dois volumes apresentaram um pequeno aumento nos tempos de verde dados pelo controlador *fuzzy*, aproximadamente 8% maior que os tempos fixos calculados para esses casos. A coluna “Verde” da Tabela 4.18 confirma estatisticamente a diferença dos tempos de verde dados para os dois modos de controle.

As diferenças observadas entre os dois modos de controle testados em relação ao privilégio dado à via arterial, para as medidas de desempenho do tráfego e resposta do controlador, foram em sua maioria estatisticamente significativas. Como pode ser verificado pela Tabela 4.18 de valores de p para os testes de significância estatística para modo de controle, dos 96 casos testados, 4 apresentaram diferenças não significativas (*111-VA-Par/Veh*; *131-VA-%Par*; *131-VM-AM*; *333-VM-AM*).

Tabela 4.18 Valores de p para os testes ANOVA e WILCOXON, para verificação da significância estatística do modo de controle, para medidas por tipo de via

Rede/Volume/APP		AM	%Par	Par/Veh	Verde	
111	A	Total Arterial	0.0003*	<.0001	0.2088	<.0001*
		Total Secundária	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	M	Total Arterial	0.0002*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		Total Secundária	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	B	Total Arterial	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
131	A	Total Arterial	<.0001	0.0034	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001*	0.1672	0.0085*	<.0001*
	M	Total Arterial	0.1932*	<.0001*	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
	B	Total Arterial	<.0001	0.0005	0.0015	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
313	A	Total Arterial	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*
	M	Total Arterial	0.0266*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
	B	Total Arterial	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001*	<.0001	<.0001*
333	A	Total Arterial	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		Total Secundária	<.0001*	0.0318	0.0054*	<.0001*
	M	Total Arterial	0.8073*	<.0001	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
	B	Total Arterial	<.0001	<.0001*	<.0001	<.0001*
		Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*

* valores de p para o teste de Wilcoxon.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa.

b) Análise 2: Configuração da Rede

A análise sob a configuração de rede para o controle semafórico *fuzzy* tem o propósito de verificar o impacto que a variação de distanciamento das interseções causa no desempenho do tráfego e na resposta do controlador.

A Figura 4.13 apresenta os valores médios das medidas de desempenho para as quatro estruturas de rede estudadas, separados por tipo de via e por volume veicular. Para as vias secundárias, as medidas de desempenho do tráfego permaneceram mais homogêneas para

as estruturas de redes testadas. No entanto, apenas para o volume baixo a resposta do tráfego não foi estatisticamente diferente (Tabela 4.19). Para a via arterial foi observada uma variação mais expressiva, especialmente para o volume alto. Os testes de significância estatística confirmam a diferença do desempenho do tráfego para as diferentes configurações de rede (Tabela 4.19).

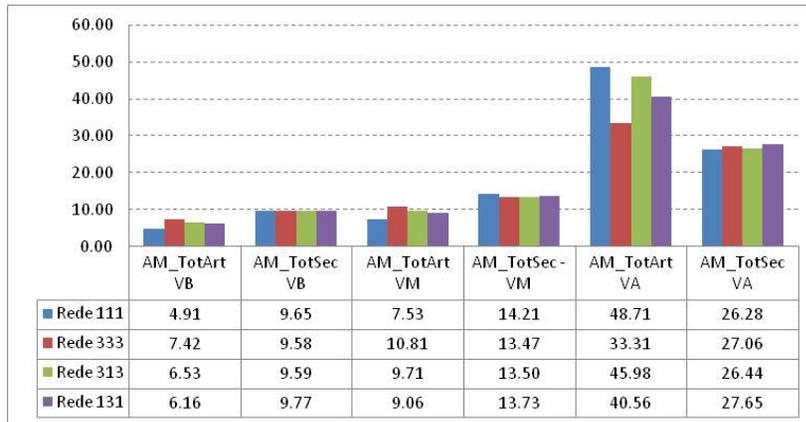
A resposta do controlador, dada pelo tempo de verde (Figura 4.13-d), também apresentou maior homogeneidade nas medidas obtidas para as vias secundárias. A diferença em valores absolutos representada no gráfico é baixa, porém é importante ressaltar que são valores médios. Assim, os valores do conjunto de dados podem ter diferenças mais expressivas que as representadas neste gráfico resumo, o que justifica o resultado do teste estatístico. Por exemplo, considerando cada configuração de rede separadamente, para o volume alto foi observada uma diferença absoluta máxima, de 0,92s, enquanto que para o volume baixo foi obtida uma diferença máxima de 0,27 segundos.

Assim, uma vez que foi comprovada a sensibilidade do controlador *fuzzy* sob diferentes configurações de rede a partir dos testes estatísticos realizados para a resposta do controlador e para o desempenho do tráfego para a maioria dos casos estudados, é relevante prosseguir nos estudos relativos ao desenvolvimento de um método específico para a operação de controladores *fuzzy* em rede.

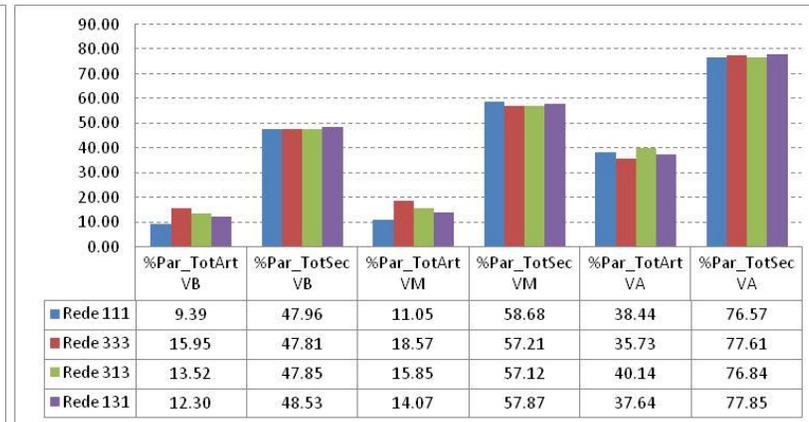
Tabela 4.19 Valores de p para os testes ANOVA e Kruskal-Wallis, para verificação da significância estatística da diferença entre as redes, para medidas por tipo de via sob o controle *fuzzy*

Volume	App	AM	%Par	Par/Veh	Verde
A	Total Arterial	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001
	Total Secundária	<.0001*	<.0001	0.006*	0.0003*
M	Total Arterial	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001
	Total Secundária	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001
B	Total Arterial	<.0001	<.0001*	<.0001	0.0081
	Total Secundária	0.1969	0.2044	0.1471	0.001

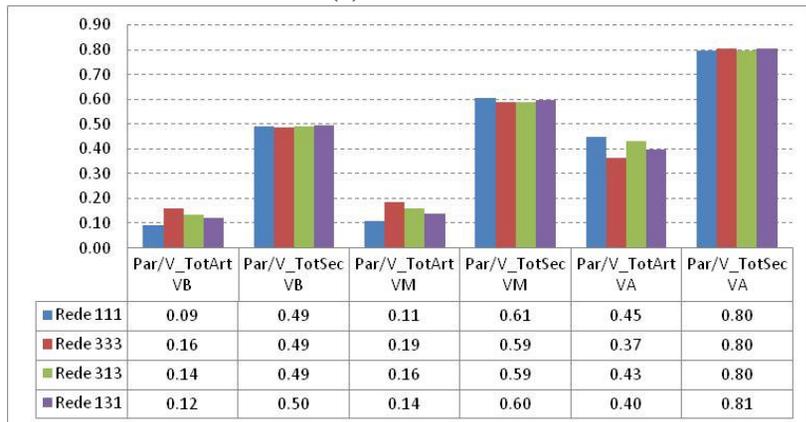
* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.
Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa.



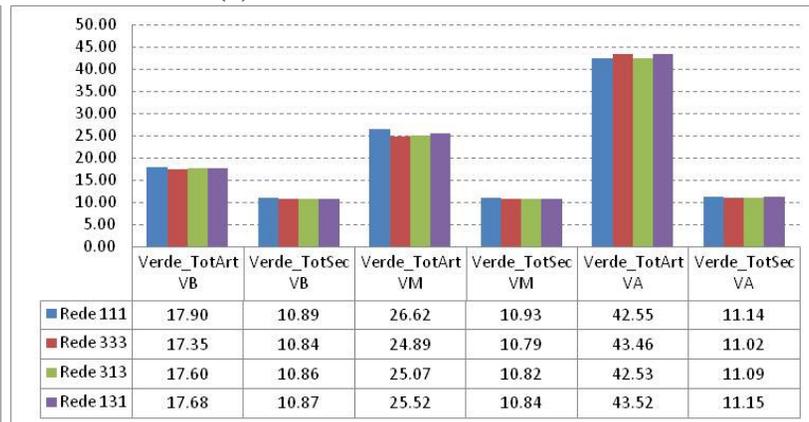
(a) Atraso Médio



(b) Percentual de Paradas Veiculares



(c) Paradas por Veículos



(d) Tempo médio de verde

Figura 4.13 Comparativo dos valores obtidos para o controle *fuzzy*, para as estruturas de redes

4.3.3 Análise por interseção

As análises realizadas nesta seção tem dois propósitos principais, (a) confirmar se as diferenças estatísticas para os dois modos de controle na operação das redes testadas é significativa por aproximação, e (b) verificar o desempenho do tráfego sob o controle *fuzzy* ao longo da arterial para avaliar se houve progressão de pelotões para esse modo de controle semafórico.

a) Resposta do controlador

A resposta do controlador para cada interseção que compõe a rede, observada pelo tempo médio de verde, além de ser influenciada pelo volume veicular ainda sofre influência pela geometria da rede. A influência do volume veicular na resposta do controlador (tempo médio de verde) é fortemente caracterizada na magnitude dos valores diferentemente da resposta do tráfego que apresenta alterações na magnitude dos valores e também na forma de variação (Figuras C-11 e C-12).

Assim como foi observado na análise realizada na seção 4.3.2, os tempos de verde dados pelo controlador semafórico *fuzzy* foram menores que os calculados para o controle por tempo fixo para a via arterial, em todos os casos; e maiores para os volumes médio e baixo da via secundária. As diferenças dos tempos de verde dados pelos dois controladores para cada aproximação da rede apresentaram diferenças estatisticamente significativas em todos os casos ($p < 0,0001$).

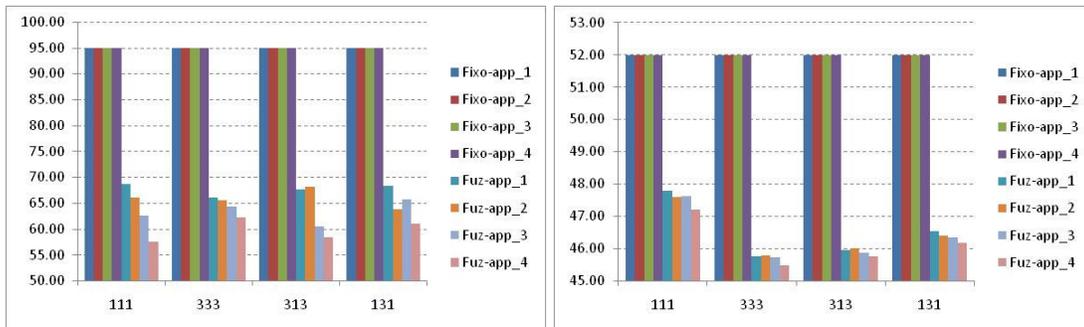
Os tempos de ciclo gerados pelos dois modos de controle diferem em até 32,5%, como pode ser observado na Tabela 4.20. O tempo médio de ciclo do controlador *fuzzy* apresentado na tabela, corresponde ao valor médio calculado a partir dos resultados obtidos para todas as aproximações da rede, para todas as arquiteturas de rede, nas 30 horas de simulação.

Tabela 4.20 Tempo médio de ciclo para cada interseção da rede, dados em segundos

Volume	Fixo-Coordenado	<i>Fuzzy</i>	Diferença %
Alto	95,0	64,0	-32,5%
Médio	52,0	46,4	-10,8%
Baixo	50,0	38,5	-23,0%

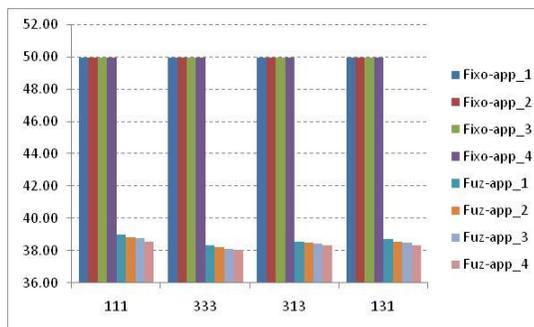
Como já foi mencionado no texto, o tempo de ciclo máximo que poderia ser atingido com o controlador *fuzzy* é de 120s. No entanto, valor máximo atingido para o ciclo médio nas simulações realizadas foi de 68,71s (obtido para a aproximação da rede 111 sob volume veicular alto).

Os tempos de ciclo obtidos pelo controlador *fuzzy* foram, em todos os casos, menores pelo menos 10% em relação ao comprimento de ciclo calculado para o controle por tempo fixo para a condição de tráfego correspondente (Figura 4.14). Tempos de ciclo menores tendem a resultar em menores atrasos médios no tráfego, o que é confirmado para o atraso obtido para a rede como um todo, conforme a discussão apresentada na seção 4.3.1 (Figuras 4.6 e 4.7 e Tabela 4.14).



(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



(c) Volume baixo

Figura 4.14 Tempo médio de ciclo por aproximação, para os modos de controle Fixo-coordenado e *Fuzzy*

Deve ainda ser observado que ao longo da rede, no sentido do tráfego, os comprimentos de ciclo tendem a diminuir em relação ao comprimento de ciclo da interseção imediatamente anterior. Dos 36 casos comparados, apenas 5 apresentaram aumento do comprimento de

ciclo em relação à interseção à montante, porém, estes foram sempre inferiores em relação à redução apresentada para os demais casos comparados (Tabela 4.21). Ou seja, as raras situações em que ocorreu o aumento do tempo de ciclo, apresentaram valores pequenos quando comparados às reduções frequentes para os demais casos. Assim, de modo global o controlador *fuzzy* apresenta ciclos menores que os calculados para o controle por tempo fixo-coordenado, que para cada nível de volume é igual para todas as interseções.

É relevante destacar ainda a amplitude de variação observada para o volume alto em relação aos volumes médio e baixo. Quanto maior o volume veicular maiores são as reduções observadas nos tempos de ciclo obtidos pelo controlador *fuzzy* ao longo da rede (Tabela 4.21). Ou seja, as chegadas em pelotão contribuem para a redução dos tempos de verde, e conseqüentemente dos comprimentos de ciclo, obtidos para cada interseção ao longo da rede sob o modo de controle atuado *fuzzy*.

As Figuras C-11 e C-12 apresentam os valores médios dos tempos de verde para cada aproximação de cada interseção que compõe a rede, separados por volume veicular e por estrutura de rede. A configuração utilizada visa facilitar a comparação entre os modos de controle testados e as interseções que compõe as redes.

Os tempos médios de verde obtidos pela inferência *fuzzy* para as aproximações da via arterial das redes em teste foram menores em relação aos tempos de verde calculados para o controle por tempo fixo para os três níveis de volume e em todas as interseções das redes (Tabela C-9). As quatro estruturas de rede apresentaram valores similares de redução desta medida, dado na média de 33,8% para o volume alto, 20,2% para o volume médio e 41,2% para o volume baixo.

Tabela 4.21 Variação Percentual do comprimento médio de ciclo de cada interseção em relação à interseção imediatamente anterior

Rede	Volume Alto			Volume Médio			Volume Baixo		
	A2/A1	A3/A2	A4/A3	A2/A1	A3/A2	A4/A3	A2/A1	A3/A2	A4/A3
111	-3.98	-5.16	-8.17	-0.41	0.05	-0.85	-0.42	-0.18	-0.47
333	-0.87	-1.81	-3.21	0.05	-0.15	-0.49	-0.24	-0.38	-0.17
313	0.87	-11.30	-3.40	0.12	-0.31	-0.24	-0.14	-0.17	-0.25
131	-6.62	2.93	-7.00	-0.33	-0.12	-0.37	-0.48	-0.17	-0.42

A2/A1: aproximação 2 em relação à aproximação 1.

Para as aproximações secundárias da rede os tempos de verde foram, em média, 44,5% menores que os tempos definidos para o controle por tempo fixo para o volume alto. Já para os demais casos os tempos de verde *fuzzy* superaram em 8,4% e 8,6% os tempos de verde do controle por tempo fixo para os volumes médio e baixo, respectivamente. Sendo assim, para esses volumes, os aumentos observados em valores absolutos não chegam a 1 segundo.

Embora tenha sido observado esse aumento nos tempos de verde das aproximações secundárias, ele não é grande o suficiente para que o tempo de ciclo destas interseções sob o controle *fuzzy* supere os tempos de ciclo calculados para o controle por tempo fixo.

Os valores do tempo de verde dados nas aproximações da via principal ao longo do trecho variam de modo decrescente, para a maioria dos casos observados (Figura C-11). As redes 313 e 131 para volume alto e médio apresentaram uma pequena variação crescente em uma das interseções. No entanto, é relevante observar se a variação dos tempos de verde observada ao longo da via arterial é estatisticamente significativa.

Para as aproximações secundárias da rede o comportamento foi contrário ao observado para a arterial para os volumes médio e baixo (Figuras C-11 e C-12). Para o volume alto os tempos semafóricos para a secundária variaram discretamente ao longo da rede, no entanto, mantendo-se em média, 8,9s menor que o tempo calculado para a operação em tempo fixo.

b) Desempenho do tráfego

É possível observar que, em termos de atraso médio para a via arterial, o tráfego responde de modo similar, porém com pequenas diferenças na magnitude dos valores, para os dois modos de controle testados. Em geral, os atrasos na via arterial sob o controle *fuzzy* são ligeiramente superiores aos obtidos com o controle por tempo fixo de modo coordenado, porém, o comportamento progressivo observado para o controle fixo-coordenado é reproduzido pelo controle *fuzzy* (ver Figura C-5). Ou seja, o controlador *fuzzy* sem nenhuma adaptação para a operação em rede consegue estabelecer uma progressão similar à observada por um controlador programado para isso. Assim, para atingir o objetivo de melhorar a fluidez num trecho arterial é adequada a realização de ajustes do controlador *fuzzy* para melhorar a fluidez.

Já para as aproximações das vias secundárias o comportamento do tráfego foi diferenciado, especialmente para o volume alto. Nesse caso pode-se observar a redução dos atrasos ao longo da rede (ver Figura C-6). Para os volumes médio e baixo esse padrão se repete, embora mais discretamente. Enquanto as diferenças observadas para o volume alto chegam a 8,7s, para os volumes médio e baixo não chegam a 1,0s.

Os resultados associados ao percentual de paradas e número de paradas por veículo produzidos pelo controle *fuzzy* com relação ao tempo fixo-coordenado têm características similares às observadas para o atraso médio.

4.4 TÓPICOS CONCLUSIVOS

O controlador *fuzzy* utilizado neste trabalho foi construído para a operação isolada. O controlador por tempo fixo definido para as simulações apresentadas também foi programado para a operação isolada, no entanto, foram calculadas as defasagens para priorizar o movimento da via arterial. As simulações realizadas com os controladores *fuzzy* não contemplaram nenhuma forma de priorização de movimento, ou seja, os controladores *fuzzy* foram simplesmente dispostos para operar nas redes definidas para os estudos. Ao confrontar os resultados obtidos pelo controle estabelecido pelo controle *fuzzy* e pelo controle fixo-coordenado foi possível observar as vantagens significativas segundo as medidas de desempenho analisadas, para a utilização dessa alternativa em rede.

Analisando os resultados em termos globais foi possível identificar vantagens estatisticamente significativas para o controle estabelecido através do controlador *fuzzy*. Estes resultados foram compreendidos mais claramente a partir da análise comparativa dos tipos de controle realizado por tipo de via. Nessa avaliação foi possível verificar que as vantagens que levaram os resultados globais obtidos pelo controle *fuzzy* à superioridade sobre o controle dimensionado para o estabelecimento da priorização da via arterial foram os ganhos significativos alcançados para as vias secundárias.

Ao avaliar somente o atraso médio fica evidente o objetivo do controlador *fuzzy* utilizado, que é otimizar a utilização da interseção, assim sendo, ela atende a interseção de modo mais eficiente que o controle por tempo fixo-coordenado, ganho que é em grande parte resultado do atendimento mais equilibrado das vias secundárias em relação às aproximações da via principal. Assim, ainda que o controle *fuzzy* não tenha sido

desenvolvido para a operação em rede, em termos globais, ele apresenta resultados superiores aos obtidos para o controle por tempo fixo-coordenado para essa operação; ressaltando que essa vantagem é obtida em função dos resultados das vias secundárias. No entanto, em se tratando de controle com o propósito beneficiar o fluxo das vias arteriais o controle por tempo fixo atende de modo mais adequado por minimizar os atrasos e paradas da arterial mais efetivamente que controle *fuzzy*.

Na análise realizada em função das arquiteturas de rede propostas ficou comprovado que o espaçamento entre as interseções impacta significativamente esse desempenho. Observou-se que, em termos da diferença do atraso médio, o controle *fuzzy* obteve pior desempenho relativa na rede 111 e melhor na rede 333, para todos os níveis de volume. Já com relação à medida de percentagem de paradas, o desempenho relativo entre os dois tipo de controle mostrou que, para o volume alto, o controle *fuzzy* também teve seu melhor desempenho para a rede 333 e o pior para a rede 111. Entretanto, para os volumes médio e baixo, a rede 333 foi onde o controle *fuzzy* apresentou o pior desempenho relativo ao controle fixo-coordenado. Nessa rede, foi também observado o pior desempenho relativo do controle *fuzzy* para a variável “paradas veiculares” no caso do volume médio.

Para o volume alto, todas as medidas de desempenho observadas na primeira interseção da via arterial (*link* externo de entrada na rede) sofreram uma grande redução em relação ao controle por tempo fixo-coordenado. Ao comparar as redes observa-se que o controle *fuzzy* atua melhor na rede 333, especialmente para o volume alto. É possível observar como a interação de volume e estrutura de rede impacta na resposta do tráfego, pois para o volume alto houve a redução de todas as medidas de desempenho para a primeira aproximação da arterial em relação ao controle por tempo fixo, já para o volume baixo ocorreu o contrário, observou-se um aumento destes resultados para todas as medidas de desempenho.

Esses resultados indicam que o estudo de mecanismos que levem à cooperação entre os semáforos *fuzzy* de interseções de vias arteriais, e que considere a distância entre as interseções sucessivas, é relevante.

No próximo capítulo são exploradas algumas alternativas para a promoção de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* projetado para interseções isoladas, porém para a operação em rede aberta.

5 APRIMORAMENTO DA OPERAÇÃO DE REDE ARTERIAL UTILIZANDO CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

O presente Capítulo, referente à etapa de “*Proposta de Cooperação de CSF*” constante da metodologia, apresenta duas alternativas para o aprimoramento da operação de redes arteriais utilizando os controladores semafóricos *fuzzy* investigados nesta tese. A primeira alternativa prevê a atribuição de pesos associados ao número de veículos presentes nas aproximações da via arterial no sentido de fazer com que a inferência *fuzzy* entenda o fluxo veicular desta aproximação mais intenso do que realmente é. A segunda alternativa propõe a ampliação da área de avaliação do controlador *fuzzy* nas aproximações da via arterial, definida originalmente no projeto deste controlador como 100m.

Para avaliar o desempenho do tráfego frente às opções em teste foram realizadas simulações com a utilização do UnB-Sitracs, e os resultados foram comparados aos obtidos pela operação em rede dos controladores semafóricos *fuzzy* sem a utilização de qualquer elemento que priorizasse a via arterial, como alguns dos casos apresentados no Capítulo 4. Os resultados dos testes comprovaram que embora o controlador *fuzzy* projetado para a operação isolada seja suficientemente robusto para se adaptar à operação em rede, é possível melhorar essa operação sem modificar elementos do controlador, ou seja, buscando alternativas de cooperação entre estas entidades independentes.

5.1 ESTRATÉGIAS PARA A OPERAÇÃO DOS CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY EM REDE

O comprovado sucesso dos controladores semafóricos *fuzzy*, em especial daqueles que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, traz fortes expectativas relacionadas à operação em rede utilizando estes controladores. Como apresentado no Capítulo 3, diversos estudos voltados ao controle semafórico já foram desenvolvidos utilizando a lógica *fuzzy*, bem como combinações desta com outras técnicas de Inteligência Artificial, tais como algoritmos genéticos, agentes inteligentes e redes neurais (Bingham, 1998; Bazzan, 2005; Bogenberger e Keller, 2001; Bogenberger *et al.*, 2001; Choy *et al.*, 2003; De Re, 1995; Dunker *et al.*, 1992; Grégoire *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2004; Oliveira *et al.*, 2005) . Em geral, estes estudos contemplam o desenvolvimento de um sistema específico para a operação em rede, ou seja, cada trabalho apresenta sempre um novo método de controle não testado anteriormente em uma estrutura mais simplificada. Esta

forma de desenvolvimento não é de fato um problema, uma vez que os estudos comprovem satisfatoriamente seu desempenho, porém estudos que prevêm o aprimoramento de alternativas já comprovadamente bem sucedidas são também desejáveis. Assim, este Capítulo apresenta alternativas para o aprimoramento da operação em rede utilizando os controladores semafóricos *fuzzy* que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, que são estruturas comprovadamente bem sucedidas para o controle de interseções isoladas.

5.1.1 Concepção

O estudo exploratório desenvolvido no Capítulo 4 comprova a robustez do controlador semafórico *fuzzy* em estudo uma vez que, sem qualquer ajuste para priorizar o movimento da via arterial, os teste realizados resultaram em medidas de desempenho tão boas, e por vezes melhores, que as obtidas pela operação por tempo fixo programada para a operação coordenada. Esse resultado foi um grande motivador para a busca de alternativas que melhorem o desempenho deste controlador na operação em rede aberta.

Uma vez que os tempos de ciclo dos controladores semafóricos *fuzzy* são variáveis em função das variações no fluxo veicular não cabe para essa forma de controle a utilização de mecanismos formais de coordenação semafórica. Porém, o estabelecimento de uma cooperação entre os controladores distribuídos na rede pode ser utilizada no sentido de privilegiar o movimento em uma dada direção, como no caso de redes arteriais. Essa cooperação pode ser feita de modo explícito em que cada controlador da rede tem informações da suas aproximações, das interseções adjacentes e, se desejável, informações de área, para a utilização desse conjunto na tomada de decisão dos tempos semafóricos dos controladores da rede; ou de modo implícito através de ações aplicadas isoladamente a cada controlador, sem alterar sua forma original de tomada de decisão (quantidade e tipo variáveis de entrada e de saída), mas que afetem os resultados da inferência destes controladores no sentido de priorizar a fluidez e viabilizar a continuidade de movimento para pelotões na direção desejada.

As alternativas apresentadas nesse estudo prevêm uma cooperação implícita em que não é realizada qualquer vinculação entre os controladores da rede. Os controladores *fuzzy* permanecem com sua estrutura inalterada, inclusive relativo à base de regras e aos

conjuntos *fuzzy*, sendo que a diferença para as alternativas aqui propostas está na “*leitura do ambiente controlado*” que resulta nos dados de entrada do controlador.

a) Alternativa 1: atribuição de pesos à via arterial

A primeira alternativa para a cooperação implícita dos controladores semafóricos *fuzzy* consiste na atribuição de pesos associados ao número de veículos presentes nas aproximações relativas à via principal. Os pesos atribuídos afetam o controlador *fuzzy* na tomada de decisão uma vez que o número real de veículos nas aproximações da via arterial é acrescido de um percentual deste valor, fazendo com que o controlador “*enxergue*” mais veículos do que realmente existe na aproximação. A proposta consiste, portanto, de buscar a priorização do movimento da via arterial através da majoração das informações de tráfego para essa via. A expectativa é de que seja efetivamente observada a priorização do fluxo da via arterial, no entanto, sem trazer prejuízos superiores aos observados para as vias secundárias verificados no controle coordenado por tempo fixo.

Foram testados dez pesos de majoração do número de veículos nas aproximações arteriais, variados a cada 20%: 1.2, 1.4, 1.6, até 3.0 (Tabela 5.1). Assim, ao atribuir o peso 1.2, o número de veículos contados será aumentado em 20%: se a contagem real consta de 10 veículos na aproximação, então irá para o controlador o total de 12 veículos.

b) Alternativa 2: aumento da área de avaliação do controlador fuzzy

A segunda alternativa prevê o aumento da área de avaliação do controlador *fuzzy* junto às aproximações da via arterial. O referido aumento irá impactar na tomada de decisão da extensão do tempo de verde, uma vez que o controlador tem acesso a uma área maior de avaliação e, por conseguinte, está sujeito a identificar um número superior de veículos para uma dada situação de tráfego quando comparado à avaliação realizada na área originalmente concebida para o controlador (Figura 5.1).

Para avaliar a proposta foram previstas cinco ampliações da área de avaliação, a cada 25 metros. Assim foram testados os casos com detectores de tráfego distanciados de 125, 150, 175, 200 e 225m da linha de retenção (Tabela 5.1).

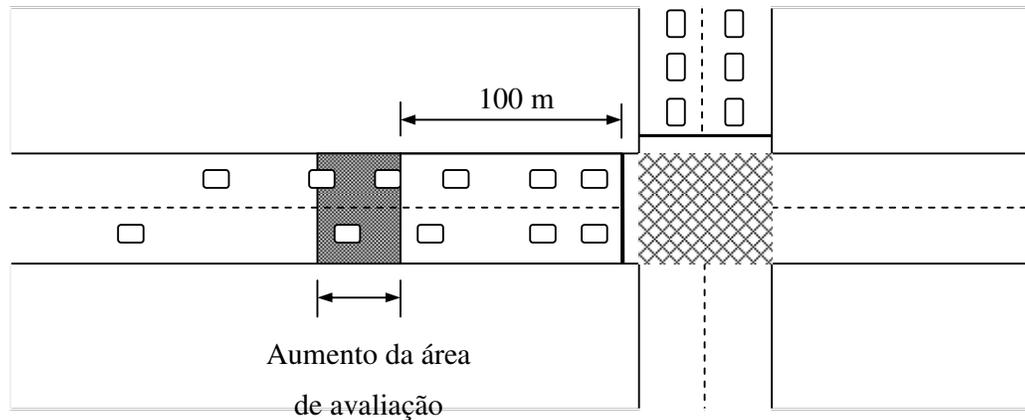


Figura 5.1 Representação do aumento da área de avaliação do controlador semafórico *fuzzy* para uma aproximação da via arterial

Conforme já mencionado no texto, os controladores *fuzzy* permanecem com sua estrutura totalmente inalterada, o que inclui os elementos do módulo de tomada de decisão composto pela base de regras e pelos conjuntos *fuzzy*. Lembrando que o controlador *fuzzy* em estudo foi concebido para operar junto a interseções com área de avaliação definida à 100m da linha de retenção da aproximação, assim, os conjuntos *fuzzy* foram construídos com o valor máximo de 20 veículos por aproximação. Ao multiplicar o número de veículos na área de avaliação por um dado “*peso*” ou ao aumentar esta área em “*n*” metros, ocorrerão situações de fila e/ou chegada com um número superior ao limite estabelecido em projeto originalmente (20 veículos). Porém quando um número de veículos maior que 20 é identificado, ele é fuzificado como “Fila Longa” ou “Chegada Muita” (Figura 3.1). Assim, em situações de fluxo veicular intenso, espera-se que o desempenho do tráfego utilizando as alternativas aqui propostas não apresente resultados significativos, porém, ao trabalhar em situações de fluxo moderado e baixo, espera-se obter uma melhoria significativa.

5.1.2 Definição dos modelos de simulação

O estudo desenvolvido neste Capítulo segue a mesma modelagem básica utilizada nas explorações do Capítulo 4, ou seja, velocidade veicular predominante de 50 *km/h* com distribuição percentual conforme apresentado na Tabela 4.2. Volume de tráfego do tipo médio classificados em três níveis, conforme apresentado na Tabela 4.3. Composição veicular simplificada a 100% de carro (tópico 4.1.2-d) com as características operacionais descritas na Tabela 4.6.

O controlador semafórico utilizado é atuado do tipo *fuzzy*, conforme especificações dispostas no Capítulo 3 para o Controlador 2 (item 3.1.4). Cada interseção é controlada por um controlador *fuzzy* que opera em modo isolado, sendo que sua operação é definida conforme descrito na Tabela 4.10.

A rede arterial proposta para os testes é composta de 4 (quatro) interseções seqüenciais distanciadas entre si de “A” e “B” metros (Figura 4.1). Todas as considerações geométricas adicionais são as mesmas descritas no Capítulo 4 desta tese. Assim, o resumo das variáveis utilizadas nas simulações é apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 Resumo das variáveis de simulação

Nível de Volume ⁽¹⁾	Rede ⁽²⁾	Pesos	Afastamento da LR ⁽³⁾
Alto = 2.200 x 660	111	1.0 ⁽⁴⁾	100 ⁽⁴⁾
Médio = 1.600 x 500	333	1.2	125
Baixo = 1.200 x 400	131	1.4	150
-	313	1.6	175
-	-	1.8	200
-	-	2.0	225
-	-	2.2	-
-	-	2.4	-
-	-	2.6	-
-	-	2.8	-
-	-	3.0	-

⁽¹⁾ Volume em *vph*.

⁽²⁾ Distâncias diferentes entre as interseções consecutivas.

⁽³⁾ Distância entre o detector de tráfego e a Linha de Retenção, em metros.

⁽⁴⁾ Peso e Afastamento da LR definidos como casos básicos, ou seja, sem privilegiar a via arterial.

Em função da estrutura da rede 100-100-100 não permitir as variações propostas pela alternativa 2, esta configuração de rede não foi utilizada para este caso.

Como o estudo prevê a realização de testes de significância estatística foram utilizadas trinta horas independentes de simulação para cada situação proposta, por exemplo, *Vol.Alto-111-PI,2* (volume alto, rede 111 e peso na aproximação arterial igual a 1,2) ou *Vol.Médio-333-LR175* (volume médio, rede 333 e afastamento de linha de retenção igual a 175m).

Assim como no Capítulo 4, é também aqui disponibilizado na Tabela 5.2 o conjunto de sementes utilizadas na inicialização das simulações realizadas no UnB-Sitracs para viabilizar a replicação dos resultados obtidos no presente estudo.

Tabela 5.2 Conjunto de sementes de inicialização das 30 horas de simulação

Hora	Semente	Hora	Semente
H-1	1218198787225	H-16	1244642711234
H-2	1218198827083	H-17	1244642729671
H-3	1218199003366	H-18	1244642748421
H-4	1218199074252	H-19	1244642824328
H-5	1242758918812	H-20	1244642899187
H-6	1242758965109	H-21	1244642917078
H-7	1242759011968	H-22	1244642935296
H-8	1242759049062	H-23	1244642971468
H-9	1242759235218	H-24	1244643009453
H-10	1242759322234	H-25	1244643028796
H-11	1242759362984	H-26	1244643047515
H-12	1242759479593	H-27	1242758841468
H-13	1242759525546	H-28	1244642692562
H-14	1242759568437	H-29	1251079991843
H-15	1242759723171	H-30	1251080028625

Para as avaliações das propostas foram utilizadas as medidas de desempenho do tráfego “*atraso médio*”, “*percentual de paradas veiculares*” e “*número médio de paradas por veículo*”.

5.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS

As análises dos resultados foram realizadas para cada uma das alternativas propostas e, por fim, comparadas entre si para verificar a melhor opção de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* para o controle das redes abertas testadas. Com o intuito de verificar, tanto o desempenho da rede de modo global, como da fluidez na via arterial, as análises foram realizadas em dois níveis: avaliação para rede como um todo e para a via arterial.

As avaliações contemplam análises descritivas realizadas a partir dos valores médios das medidas de desempenho do tráfego e de testes de significância estatística. A análise descritiva é baseada em análises gráficas de cunho comparativo através de diagramas de barras verticais construídos a partir de valores médios obtidos para as trinta horas de simulação consideradas.

Os testes de significância definidos inicialmente para o estudo foram a Análise de Variância (ANOVA) e o teste de Tukey. A utilização destes testes prevê a normalidade dos grupos (amostras) e a homogeneidade das variâncias dos grupos comparados. Em caso de

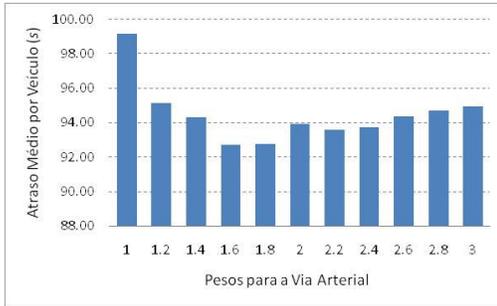
não atendimento das premissas de utilização destes testes, que são paramétricos, foram aplicados os testes não-paramétricos correspondentes, ou seja, Wilcoxon, para análise de 2 grupos e Kruskal-Wallis, para análise de 2 ou mais grupos.

A verificação da normalidade dos grupos de dados foi feita mediante a aplicação de quatro testes: Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Cramer-von Mises e Anderson-Darling. Para este estudo um grupo não é considerado “*normal*” se dois testes, ou mais, apontarem diferenças significativas. Nesse caso os testes subsequentes são do tipo não-paramétrico. Os grupos que atenderam ao teste de normalidade devem ser submetido à verificação da homogeneidade das suas variâncias através do teste de Levene. Em caso afirmativo os testes seguintes são paramétricos (ANOVA e Tukey), caso contrário, os testes não-paramétricos completam o estudo (Wilcoxon e/ou Kruskal-Wallis). Todos os testes estatísticos foram realizados por meio da utilização do software SAS[®] (*Statistical Analysis System*).

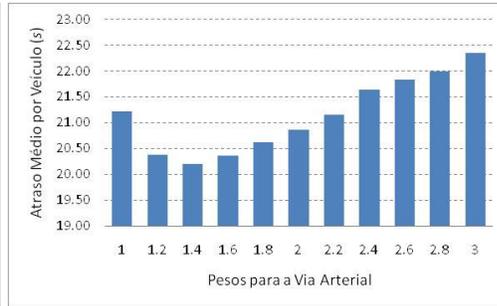
5.2.1 Análises relativas à Alternativa 1

(a) Análise global da rede

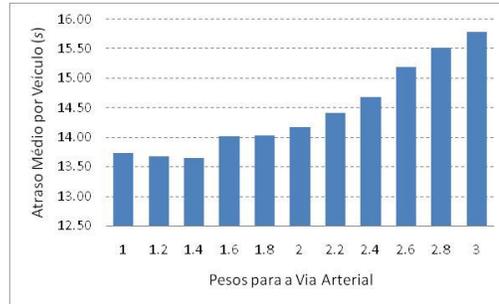
Embora o objetivo deste estudo seja voltado para alternativas de priorização da via arterial é oportuno realizar a avaliação global da rede no sentido de verificar os efeitos das propostas de priorização arterial para a rede como um todo. As Figuras 5.2, 5.3 e 5.4 ilustram os resultados obtidos para a rede 111 (atraso médio, % de paradas veiculares e paradas por veículo). Os resultados das demais redes estão disponíveis no Apêndice D.



(a) Volume Alto

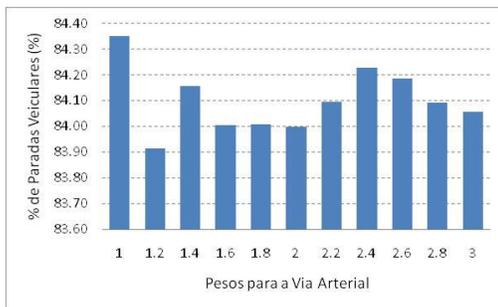


(b) Volume Médio

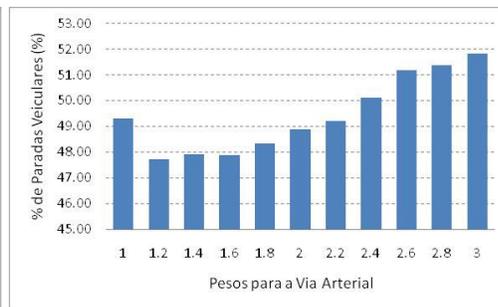


(c) Volume Baixo

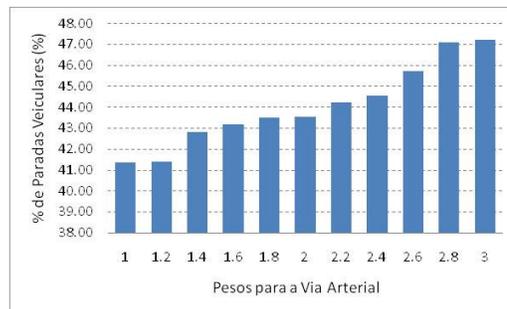
Figura 5.2 Atraso Médio para a rede 111, Alternativa 1



(a) Volume Alto

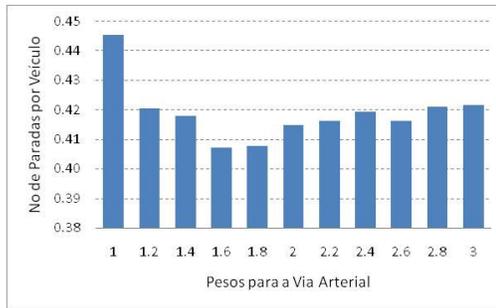


(b) Volume Médio

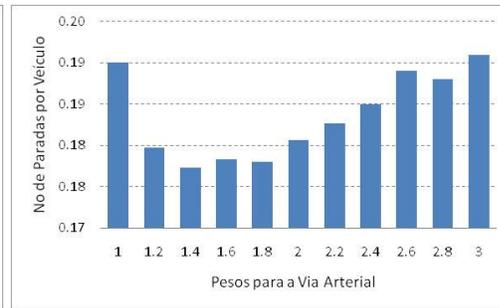


(c) Volume Baixo

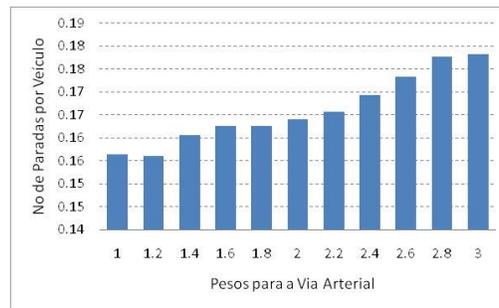
Figura 5.3 Percentual de Paradas Veiculares para a rede 111, Alternativa 1



(a) Volume Alto



(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura 5.4 Número de Paradas por Veículo para a rede 111, Alternativa 1

Ao analisar a variação do desempenho do tráfego sob análise global da rede (Tabela 5.3), observou-se que a proposta de cooperação para os controladores semafóricos *fuzzy* operando sob volume veicular alto apresentou poucos casos com diferenças estatisticamente significativas (rede 111 para atraso médio e paradas por veículo, e rede 313 para paradas por veículo). Assim, se o objetivo do controle semafórico for minimizar o percentual de paradas veiculares para a rede como um todo, para as arquiteturas de rede estudadas operando sob volume veicular alto, a proposta de cooperação não trará benefícios significativos comparados ao controle *fuzzy* convencional aplicado às interseções ao longo da rede arterial.

Tabela 5.3 Valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis para verificação da significância das diferenças das medidas de desempenho para a rede, Alternativa 1

Rede	Volume	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
111	Alto	0.0023*	0.9806*	<.0001*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001*	<.0001*	<.0001*
131	Alto	0.9046	0.186*	0.1579*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001	<.0001*
313	Alto	0.0825	0.0966*	0.0002*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001	<.0001*
333	Alto	0.9135*	0.3716*	0.3372*
	Médio	<.0001	<.0001	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001	<.0001*

* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença observada entre as alternativas de LR é significativa.

Para o atraso médio na rede 111 sob volume alto a proposta resulta em medidas estatisticamente diferentes, sendo que a operação da rede com os pesos 1.6 e 1.8 apresentaram os melhores resultados, com uma redução de aproximadamente 6% em relação à operação sem priorização do fluxo na via arterial. Em termos de paradas por veículos na mesma rede e volume (*Vol.Alto-111*) os pesos 1.6 e 1.8 também foram os que apresentaram os melhores resultados. O último caso de volume alto com diferenças significativas foi para paradas por veículo da rede 313. Para esse caso os pesos que resultaram nos melhores resultados para a medida de desempenho foram 1.8, 1.6, 1.4, 2.2 e 2.0, respectivamente. Assim, para as quatro estruturas de rede em operação sob volume alto os pesos 1.6 ou 1.8 poderiam ser utilizados sem causar prejuízos, sob a análise global da rede, trazendo ainda benefícios em relação à operação sem priorização da via arterial.

O Quadro 5.1 mostra os resultados dos testes de Tukey e Wilcoxon para a verificação de igualdade estatística das medidas de desempenho para a rede 111 sob volume alto. Os resultados destes testes para as redes e volumes estão apresentados nos Quadros D-1, D-2, D-3 e D-4 do Apêndice D.

Quadro 5.1 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 111, volume alto, Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio			% de Paradas veiculares			Paradas por Veículo			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
111	A	1,0	-	1	99.15	A	1	84.4	A	1	0.45	-	-	-
		1,2	-	1.2	95.14	A	2.4	84.2	B	3	0.42	0.0069	-	-
		1,4	-	3	94.94	A	2.6	84.2	B	2.8	0.42	0.0022	-	-
		1,6	-	2.8	94.72	A	1.4	84.2	B	1.2	0.42	<.0001	-	<.0001
		1,8	-	2.6	94.37	A	2.2	84.1	B	2.4	0.42	0.0003	-	-
		2,0	-	1.4	94.30	A	2.8	84.1	B	1.4	0.42	0.0005	-	-
		2,2	-	2	93.90	A	3	84.1	B	2.2	0.42	0.0013	-	<.0001
		2,4	-	2.4	93.72	A	1.8	84.0	B	2.6	0.42	0.0007	-	-
		2,6	-	2.2	93.61	A	1.6	84.0	B	2	0.42	0.0011	-	-
		2,8	-	1.8	92.76	A	2	84.0	B	1.8	0.41	0.0007	-	-
		3,0	-	1.6	92.71	A	1.2	83.9	B	1.6	0.41	0.0039	-	-

Classificação Tukey: a classificação Tukey é apresentada apenas para os pesos cujos conjuntos passaram pelo teste de normalidade e, em comparação com o conjunto de $peso=1.0$ apresentaram variâncias homogêneas. Cada letra disposta na coluna “**Classificação Tukey**” identifica um grupo definido como estatisticamente igual assim, pesos que possuem a mesma identificação de grupo são pesos que resultaram em medidas estatisticamente iguais entre si. A letra lida na coluna “**Classificação Tukey**” é relativa ao peso mostrado na coluna “**Peso**”. Os dados da coluna “**Pesos em ordem decrescente**” devem ser lidos pareados com os dados da coluna relativa à medida de desempenho na coluna justaposta (“**AM_Rd**”, “**%Par_Rd**” e “**Par/Veh_Rd**”), também apresentados em ordem decrescente. Essa forma de apresentação visa facilitar a visualização dos melhores resultados obtidos por peso.

Valor de p teste Wilcoxon: os resultados do teste de Wilcoxon são apresentados para os conjuntos de dados que não passaram pelo teste de normalidade ou, em comparação com o conjunto de $peso=1.0$ não apresentou variâncias homogêneas. Os resultados de p para Wilcoxon são resultados das comparações feita de cada conjunto de dados de $peso="n"$ com o conjunto de $peso=1.0$, ou seja, são testes para dois conjuntos de dados. Assim, o valor de p afirma apenas se o conjunto de $peso=n$ é estatisticamente igual ao conjunto de $peso=1.0$. Os valores de p devem ser lidos para as referências de peso apresentadas na coluna “**Peso**”.

* $n = 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, 2.4, 2.6, 2.8$ ou 3.0 .

Observando a Tabela 5.4 e os Quadros D-1 a D-4 é possível verificar que na avaliação da rede como um todo a proposta apresentada mostrou-se eficiente em alguns casos isolados. Embora tenha-se verificado diferenças estatisticamente significativas para todas as estruturas de rede e medidas de desempenho analisadas quando submetidas aos volumes médio e baixo, os melhores resultados foram obtidos para a operação com os pesos que resultaram em medidas estatisticamente iguais às obtidas com o peso 1.0, ou seja, sem priorização da via arterial. Dos 24 cenários testados considerando volumes médio e baixo, 8 apresentaram resultados significativos que justifique a aplicação da proposta de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* (ver Tabela 5.4).

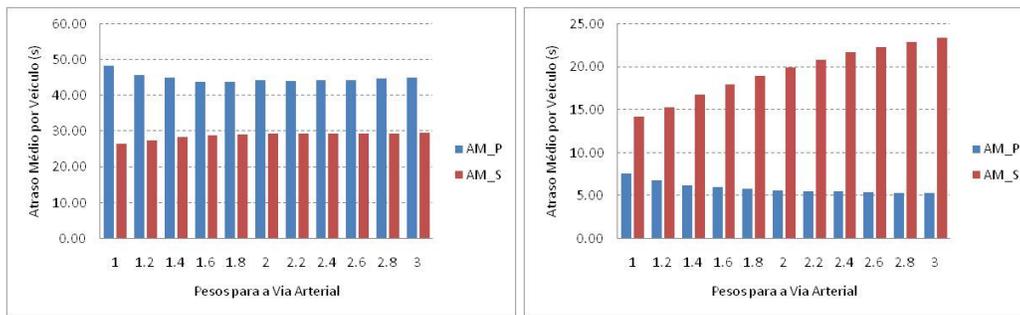
Tabela 5.4 Melhor alternativa de peso para as aproximações da via arterial

Objetivo	Arquitetura da Rede Arterial	Volume Veicular	Peso atribuído às aproximações da via arterial
Minimizar o atraso global da rede	111	<i>Médio*</i>	1.4
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
	131	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
	313	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		<i>Baixo*</i>	1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
	333	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
Minimizar o % de paradas veiculares global da rede	111	<i>Médio*</i>	1.2
		Baixo	1.0 ou 1.2
	131	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6 ou 1.8
		Baixo	1.0, 1.2 ou 1.4
	313	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 ou 2.0
		Baixo	1.0 ou 1.2
	333	Médio	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0 ou 2.2
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6 ou 1.8
Minimizar as paradas por veículos na rede	111	<i>Médio*</i>	1.4
		Baixo	1.0 ou 1.2
	131	Médio	1.0, 2.6, 2.8 ou 3.0
		Baixo	1.0, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2 ou 2.4
	313	<i>Médio*</i>	2.0
		<i>Baixo*</i>	1.4
	333	<i>Médio*</i>	2.0 ou 2.2
		<i>Baixo*</i>	1.8 ou 2.0

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com o peso 1.0.

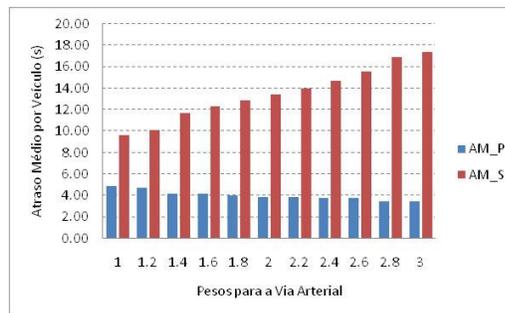
(b) Análise para a via arterial

Avaliando os gráficos das Figura 5.5, 5.6 e 5.7 juntamente com os demais disponíveis no Apêndice D relativos às medidas de desempenho dadas por tipo de via, é possível verificar que à medida que os resultados das medidas de desempenho melhoram para a via arterial, em geral com o aumento do peso dados à arterial, os valores das medidas de desempenho das vias secundárias pioram de modo crescente. Esse efeito já era esperado em função da prioridade dada à via arterial, o que comprova a hipótese de que a atribuição de pesos ao número de veículos nas aproximações arteriais dos controladores *fuzzy* impactam na priorização da corrente de tráfego nessa direção.



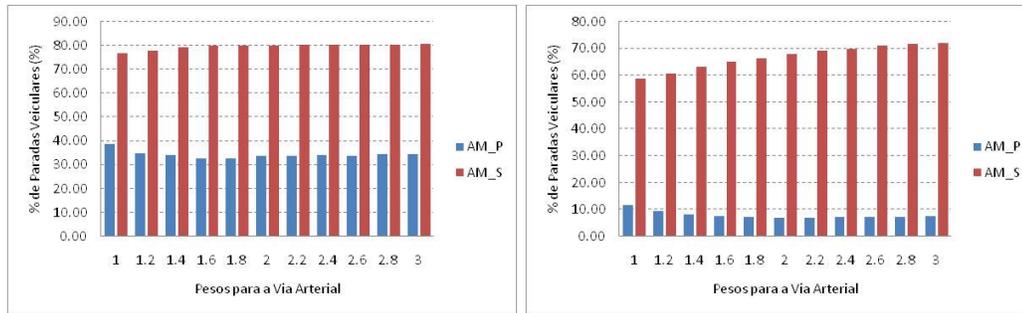
(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



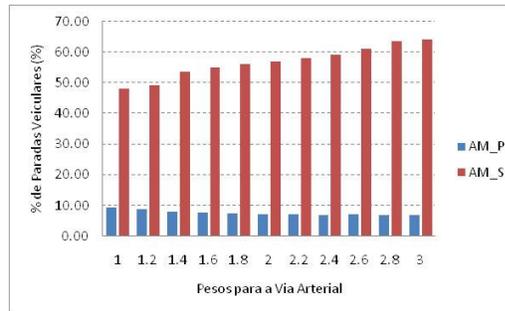
(c) Volume Baixo

Figura 5.5 Atraso Médio por tipo de via para rede 111, Alternativa 1



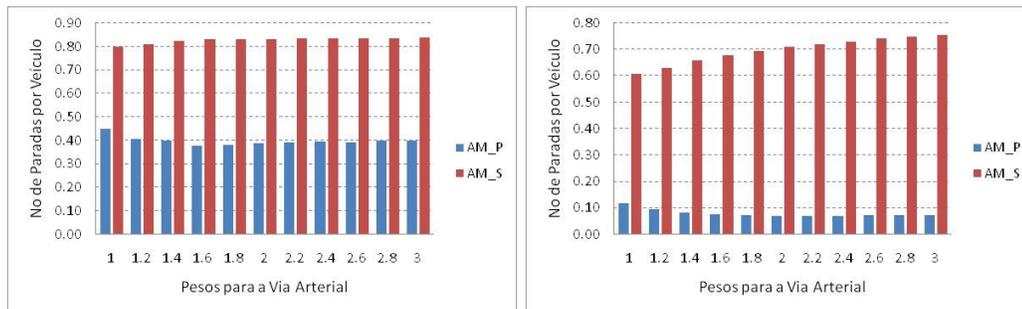
(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



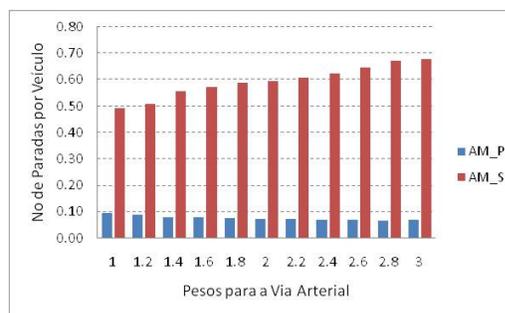
(c) Volume Baixo

Figura 5.6 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via para rede 111, Alternativa 1



(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura 5.7 Número de Paradas Veiculares por tipo de via para rede 111, Alternativa 1

Os testes de significância estatística (Tabela 5.5) revelam que para o volume alto as mudanças observadas no desempenho do tráfego foram significativas, em geral, em relação à operação sem a atribuição de pesos ($p=1.0$). Porém, é válido ressaltar que muitos casos apresentaram igualdade estatística entre os demais pesos testados (Quadros D-5 a D-8). Por exemplo, para o atraso médio as redes 131 e 333 não apresentaram diferenças estatisticamente significativas dos pesos estudados em relação à operação com o $p=1.0$. Para as duas outras arquiteturas (111 e 313), o teste de Wilcoxon (aplicado a rede 111) não traz igualdade estatística de nenhum dos pesos estudados em relação ao peso 1.0 ; já o teste de Tukey aplicado na avaliação da rede 313 mostra que todos os pesos estudados resultam em atrasos médios estatisticamente iguais entre si, porém, alguns deles são diferentes do peso 1.0 . Isto é, os pesos 1.4 , 1.6 , 1.8 , 2.0 e 2.2 são estatisticamente diferentes do peso 1.0 .

Tabela 5.5 Alternativa 1: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis

Rede	Volume	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
111	Alto	<.0001*	<.0001	<.0001*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001*	<.0001*	<.0001*
131	Alto	0.7033	0.0002	0.0057
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001*	<.0001*
313	Alto	0.0148	<.0001	<.0001
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001*	<.0001	<.0001*
333	Alto	0.6429*	0.0038	0.0126
	Médio	<.0001*	<.0001	<.0001
	Baixo	<.0001*	<.0001*	<.0001*

* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença observada entre as alternativas de LR é significativa.

Para os volumes médio e baixo observou-se que os resultados de atraso médio obtidos para os pesos 2.8 e 3.0 para a via arterial, destacados como os melhores resultados, foram sempre estatisticamente diferentes dos obtidos com o peso 1.0 . Os ganhos em atraso médio para a via arterial obtidos com esses pesos foram de aproximadamente 30% em relação à operação padrão para os dois níveis de volume e para todas as arquiteturas de rede. É importante destacar que os prejuízos causados às vias secundárias com a priorização da via

arterial nesses níveis chegam à aproximadamente 80% em relação à operação padrão do controlador *fuzzy* em rede para o atraso médio.

O percentual de paradas veiculares seguiu o mesmo padrão observado no atraso médio, ou seja, à medida que o peso atribuído à via arterial aumenta os resultados da medida de desempenho para a via arterial são melhores. Porém é possível observar (Figuras D-8, D-20, D-32 e D-44) que os ganhos obtidos para a via arterial são mais expressivos que os prejuízos observados para as vias secundárias, sendo que no nível máximo de priorização avaliado (3.0) os ganhos da arterial ficam na ordem de 40% enquanto que os prejuízos para as secundárias ficam em 30%.

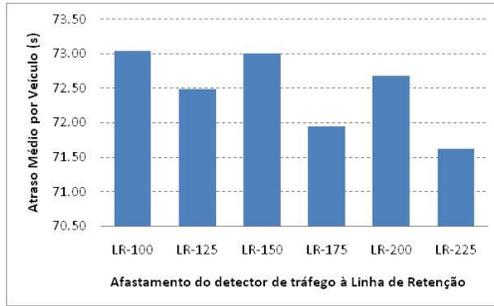
O número de paradas por veículo apresentou resultados similares aos obtidos para o percentual de paradas veiculares, sendo que, em geral, os ganhos relativos obtidos para a via arterial são da mesma proporção das perdas observadas nas secundárias. Esses valores variam de 20% a 40% para os casos testados neste estudo.

Na análise da via arterial não foi realizada uma identificação dos melhores pesos para sua operação, pois, como já foi observado na Tabela 5.4 para a análise em rede, também para a análise por tipo de via os pesos resultaram em medidas de desempenho estatisticamente iguais entre si em sua maioria. A diferença é que, diferentemente do observado para a rede, a maioria dos resultados apresentados para a via arterial foi estatisticamente diferente do peso básico ($p=1.0$).

5.2.2 Análises relativas à Alternativa 2

(a) Análise global da rede

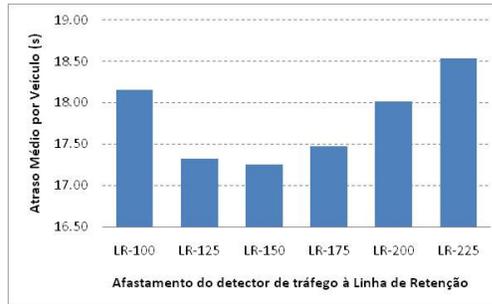
As Figuras 5.8, 5.9 e 5.10 apresentam um conjunto de resultados das medidas de desempenho obtidos para os testes realizados na rede 333 para a Alternativa 2 de cooperação dos controladores semafóricos *fuzzy*. Os resultados relativos às redes 131 e 313 seguem apresentadas no Apêndice D. Para a rede 333, os resultados para o volume alto, para as três medidas de desempenho, varia de modo irregular, enquanto que para os volumes médio e baixo seguem um comportamento tendencioso à medida que a área de avaliação do controlador aumenta.



(a) Volume Alto

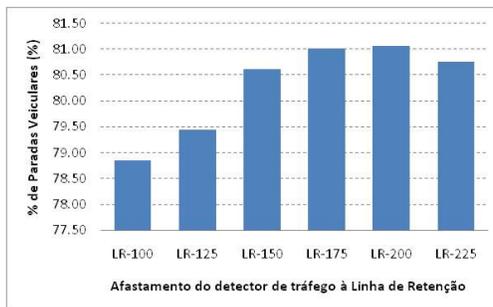


(b) Volume Médio

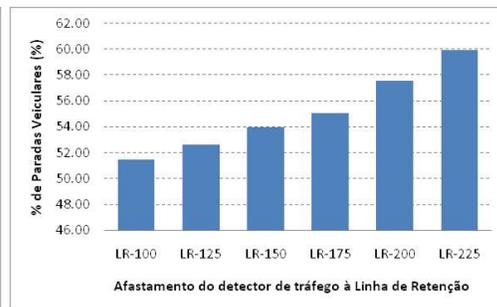


(c) Volume Baixo

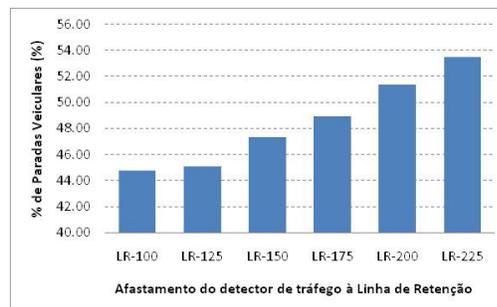
Figura 5.8 Atraso Médio para rede 333, Alternativa 2



(a) Volume Alto

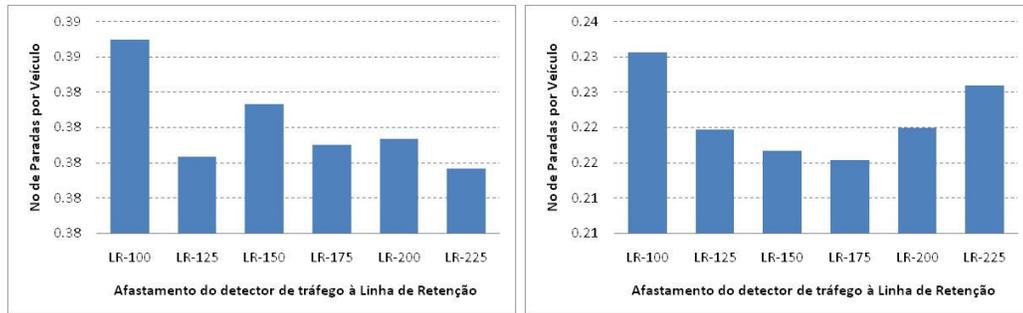


(b) Volume Médio



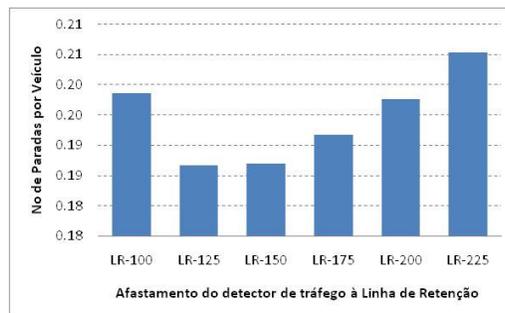
(c) Volume Baixo

Figura 5.9 Percentual de Paradas Veiculares para rede 333, Alternativa 2



(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura 5.10 Número de Paradas Veiculares para rede 333, Alternativa 2

Os testes estatísticos realizados para os resultados globais da rede mostram que sob o volume alto o tráfego responde de modo discreto às modificações realizadas relativas ao posicionamento dos detectores ao longo da via arterial, resultando em sua maioria, em diferenças não estatisticamente significativas. Conforme era esperado, para os volumes médio e baixo o desempenho do tráfego na rede modifica de modo significativo diante das alterações testadas na Alternativa 2 (Tabela 5.6).

De modo geral, é possível verificar que a Alternativa 2 não traz grandes ganhos quando a avaliação é feita para a rede de modo global. Para os 18 casos testados relativos aos volumes médio e baixo, que apresentaram diferenças estatisticamente significativas sob ANOVA ou Kruskal-Wallis, apenas 4 apresentaram resultados vantajosos e estatisticamente diferentes em relação ao caso básico (*LR-100*), como mostra a Tabela 5.7. Assim, quando o objetivo do controle for priorizar a via arterial, porém de modo a não causar grandes prejuízos para o conjunto de vias secundárias, a Alternativa 2 apresentou vantagens de aplicação apenas para a arquitetura de rede 333 (Tabela 5.7).

Tabela 5.6 Alternativa 2: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis

Rede	Volume	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
131	Alto	0.9729	0.5992*	0.9052*
	Médio	<.0001*	<.0001	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001	<.0001*
313	Alto	0.9827	0.0006*	0.4239*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001*	<.0001*
333	Alto	0.9756*	0.0018*	0.7787
	Médio	0.0001	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001*	<.0001	<.0001*

* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença observada entre as alternativas de LR é significativa.

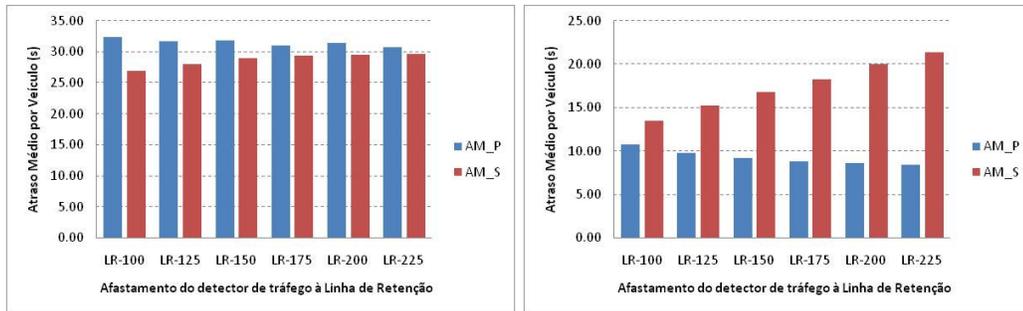
Tabela 5.7 Melhor alternativa de distanciamento do detector de tráfego até a linha de retenção

Objetivo	Arquitetura da Rede Arterial	Volume Veicular	Distância do detector de tráfego até a LR
Minimizar o atraso global da rede	131	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100, 125 ou 150 m
	313	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100, 125 ou 150 m
	333	Médio*	125, 150 ou 175 m
		Baixo*	150 ou 175 m
Minimizar o % de paradas veiculares global da rede	131	Médio	100 m
		Baixo	100 m
	313	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100 m
	333	Médio	100 m
		Baixo	100 ou 125 m
Minimizar as paradas por veículos na rede	131	Médio	100 m
		Baixo	100 m
	313	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100 ou 125 m
	333	Médio*	175 m
		Baixo*	125 m

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com LR=100m.

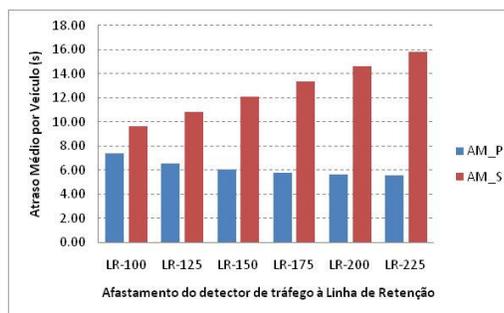
(b) Análise para a via arterial

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.11, 5.12 e 5.13, relativo aos resultados das medidas de desempenho por tipo de via para a rede 333, bem como os das redes 131 e 313 disponíveis no Apêndice D, permitem verificar as variações relativas ocorridas nas medidas de desempenho para as simulações realizadas sob as 5 alternativas de afastamento da linha de retenção propostas neste estudo.



(a) Volume Alto

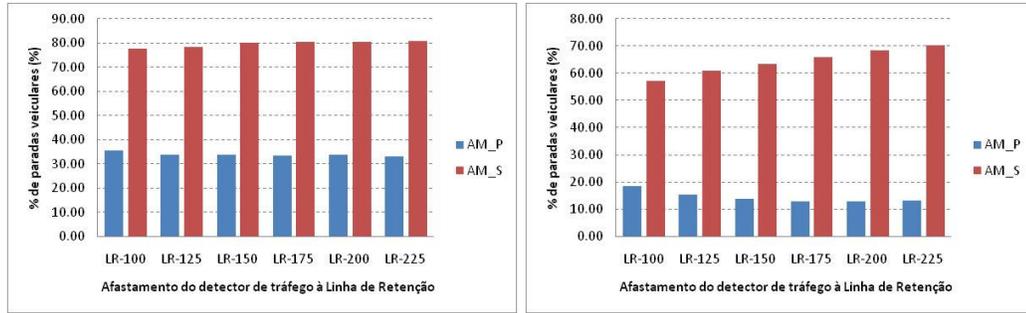
(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

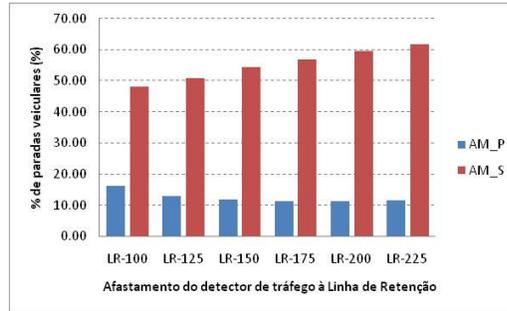
Figura 5.11 Atraso Médio por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2

Relativo à via arterial para o volume alto não foram observadas grandes variações no atraso médio submetido às 5 opções para a Alternativa 2. Especialmente para as redes 131 e 313, os ganhos observados na via arterial não passaram 2,5% em relação ao valor obtido com a linha de retenção definida originalmente para o controlador *fuzzy* (LR-100) (Figuras D-51(a), D-52(a), D-63(a) e D-64(a)). A inexpressividade da melhoria, já prevista e observada na análise descritiva, foi comprovada pelos testes estatísticos (ANOVA ou Kruskal-Wallis) (Tabela 5.8) que mostraram a irrelevância do posicionamento da linha de retenção nos resultados de atraso médio para as redes 131 e 313 para o volume alto.



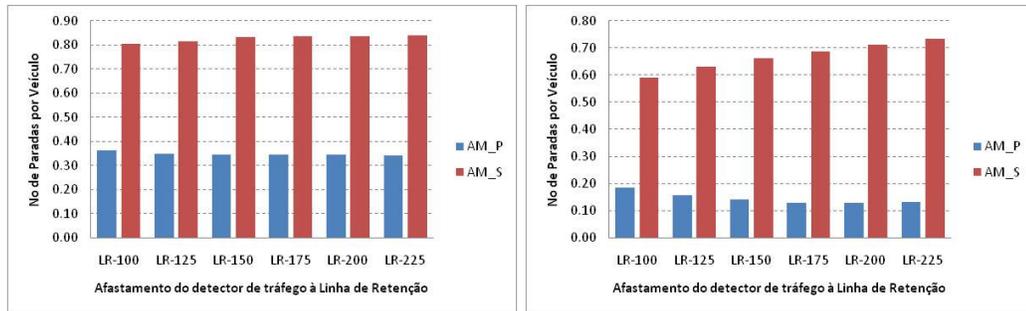
(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



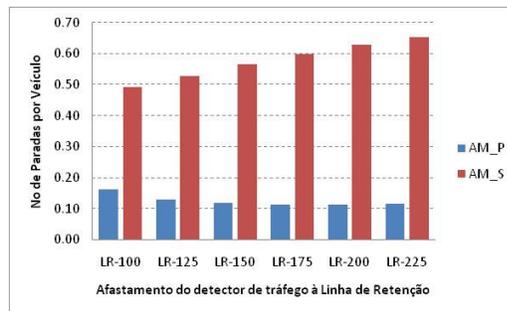
(c) Volume Baixo

Figura 5.12 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2



(a) Volume Alto

(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura 5.13 Número de Paradas Veiculares por tipo de via, para rede 333, Alternativa 2

Embora as reduções percentuais para as demais medidas de desempenho obtidas com estas redes em operação com volume alto, tenham sido superiores às observadas no atraso médio (aproximadamente 6%), também foi verificada a igualdade estatística dos valores obtidos (ver Quadro D-10). Para a rede 333 é possível observar uma leve tendência logarítmica para a diferença percentual (Figura D-76(a)) do atraso médio das aproximações secundárias à medida que o detector de tráfego é afastado da linha de retenção, e a variação irregular, com tendência decrescente desta medida para a via arterial, porém, estatisticamente não significativas. O percentual de paradas veiculares e paradas por veículo variaram de modo irregular para a rede 131, resultando também em variações não estatisticamente significativas.

Tabela 5.8 Alternativa 2: valores de p dos testes estatísticos ANOVA e Kruskal-Wallis

Rede	Volume	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
131	Alto	0.9742	0.9612*	0.9427*
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001	<.0001
313	Alto	0.9792	0.2306	0.2872*
	Médio	0.0046*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001*	<.0001	<.0001
333	Alto	0.7676*	0.0252	0.0731
	Médio	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Baixo	<.0001	<.0001*	<.0001*

* valores de p para o teste de Kruskal-Wallis.

Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença observada entre as alternativas de LR é significativa.

Para a rede 313 as diferenças observadas para as medidas de desempenho atraso médio e paradas por veículo também foram não significativas. Já para o percentual de paradas veiculares as diferenças observadas foram significativas, e a alternativa mais vantajosa para a via arterial com esta arquitetura de rede submetida ao volume alto é a LR-225, ou seja, o detector de tráfego localizado à 225m da linha de retenção.

Para os volumes médio e baixo ocorreram, em todas as medidas de desempenho, casos com diferenças estatisticamente diferentes, ou seja, para esses volumes a variação da área de avaliação do controlador *fuzzy* traz impactos significativos no desempenho do tráfego.

É importante ressaltar que ocorreram casos de variação de LR que resultaram em medidas de desempenho para a via arterial piores que as observadas sem intervenção. Para o atraso

médio as distâncias superiores à 175m resultaram em prejuízo para a via arterial da rede 131 sob volumes médio e baixo. É também observado para o percentual de paradas veiculares e para paradas por veículo para as redes 131 e 313, para os volumes médio e baixo. Nesses últimos ocorreram prejuízos também para LR-150 (Figuras do Anexo D). Vale ainda destacar que para esses volumes os prejuízos causados nas vias secundárias é sempre crescente à medida que a distância do detector de tráfego até a linha de retenção aumenta.

Em resumo, a Alternativa 2 mostrou resultados significativos apenas quando aplicada na rede 333 para os volumes médio e baixo, que resultaram em diferenças estatisticamente significativas e vantajosas (redução de 20% a 30% nas medidas de desempenho analisadas) em relação ao caso básico (LR=100m).

Tabela 5.9 Melhor alternativa de distanciamento do detector de tráfego até a linha de retenção

Objetivo	Arquitetura da Rede Arterial	Volume Veicular	Distância do detector de tráfego até a LR
Minimizar atrasos da via arterial	131	<i>Médio*</i>	125 m
		<i>Baixo*</i>	125 m
	313	<i>Médio*</i>	150, 175 ou 100 m
		<i>Baixo*</i>	150 m
	333	<i>Médio*</i>	200 ou 225 m
		<i>Baixo*</i>	175, 200 ou 225 m
Minimizar % de paradas veiculares ou paradas por veículos na via arterial	131	Médio	100 ou 125 m
		Baixo	100 ou 125 m
	313	Médio	100 ou 125 m
		<i>Baixo*</i>	125 ou 150 m
	333	<i>Médio*</i>	175 ou 200 m
		<i>Baixo*</i>	150, 175, 200 ou 225 m

* Casos em que os resultados foram estatisticamente diferentes e melhores que os obtidos com LR=100m.

É relevante destacar que as melhores alternativas apresentadas na Tabela 5.9 consideram, exclusivamente, os valores das medidas de desempenho em questão para a via arterial. É possível encontrar uma solução que privilegie a via arterial sem, contudo, causar prejuízos excessivos nas aproximações secundárias. Especialmente em casos como o do volume baixo da rede 333, para minimizar as medidas relativas à paradas veiculares tem-se um grande número de opções estatisticamente iguais para a via arterial. Nesse caso específico é possível observar pelas Figuras D-80(c) e D-84(c), que a melhor solução, considerando

também o conjunto de vias secundárias, seria manter o detector de tráfego à 150m da LR. Nessa posição o prejuízo causado para o conjunto de vias secundárias em relação ao posicionamento padrão (LR-100) é de aproximadamente 12%, enquanto que, utilizando a alternativa LR-225 em que as medidas para a via arterial são estatisticamente iguais às obtidas com LR-150 observa-se um prejuízo de aproximadamente 30% para o conjunto de vias secundárias.

Com isso é possível verificar que:

- O volume veicular, a arquitetura da rede e os objetivos do controle a ser estabelecido impactam significativamente na decisão acerca do posicionamento dos detectores de tráfego na via arterial com o propósito de estabelecer a cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* para essa modalidade de rede.
- É relevante observar, em segundo plano, os impactos causados nas aproximações secundárias, pois, em alguns casos é possível manter o nível de fluidez na via arterial sem causar prejuízos excessivos no conjunto de vias secundárias da rede.

5.2.3 Análise conjunta dos resultados relativos à via arterial

As Tabelas D-1 à D-9, disponíveis no Apêndice D deste documento, trazem um comparativo descritivo dos resultados obtidos no estudo do Capítulo 4 (“Fixo Coordenado” e “*Fuzzy*”) e dos resultados obtidos nos estudos do Capítulo 5 (“*Fuzzy P=1,LR=100*”; “Cooperação *Fuzzy A1*” e “Cooperação *Fuzzy A2*”). Esses resultados não foram testados estatisticamente em função de quatro das sementes utilizadas na inicialização das simulações no UnB-Sitracs serem diferentes. Porém, em função dos resultados de “*Fuzzy*” (oriundos do Capítulo 4) e de “*Fuzzy P=1,LR=100*” (deste Capítulo 5) serem bastante similares, por se tratarem das mesmas condições de controle, decidiu-se estabelecer esse comparativo no sentido de trazer mais uma análise para o estudo em questão. Os pesos empregados na Alternativa 1 e as distâncias dos detectores às LRs na Alternativa 2 nos casos comparados na Tabela 5.10 estão indicados nas Tabelas D-1 a D-9.

Analisando os resultados obtidos para o atraso médio com volume alto é possível verificar que o controle *fuzzy* sem qualquer priorização da arterial já traz benefícios para a operação da rede aberta, reduzindo significativamente os atrasos na via arterial (Tabela 5.10). Essas redes submetidas às alternativas propostas (A1 e A2) resultaram ganhos quando

comparados com o obtido pelo controle *fuzzy* convencional, porém, vale lembrar que alguns desses ganhos já avaliados nos tópicos anteriores, não foram estatisticamente significativos.

Tabela 5.10 Diferença percentual entre atraso médio obtido pelas alternativas de controle *Fuzzy* em relação ao controle fixo coordenado

Volume Alto						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	-8%	-32%	-16%	-25%	-	-
131	-27%	-28%	-33%	-22%	-29%	-28%
313	-20%	-29%	-31%	-22%	-22%	-25%
333	-40%	-28%	-44%	-21%	-43%	-21%

Volume Médio						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	10%	-21%	-14%	0%	-	-
131	1%	-24%	-15%	-2%	-2%	-18%
313	1%	-25%	-15%	-3%	-3%	-7%
333	-2%	-25%	-16%	-2%	-15%	-7%

Volume Baixo						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	28%	-40%	-2%	-3%	-	-
131	19%	-39%	-7%	-8%	12%	-34%
313	22%	-40%	-6%	-9%	10%	-28%
333	18%	-39%	-7%	-8%	-12%	0%

Para os volumes médio e baixo a operação com o controlador *fuzzy* na rede sem priorização da via arterial traz prejuízos à via arterial quando comparado com o controle por tempo fixo coordenado (salvo para a rede 333 sob volume médio), por outro lado, traz reduções altamente significativas para o conjunto de vias secundárias. Ao implementar as alternativas de cooperação dos controladores *fuzzy* é possível identificar casos em que houve melhoria do atraso médio para os dois tipos de vias, porém em níveis inferiores aos observados para as vias secundárias sob o controle *fuzzy* convencional. As redes 131 e 313 sob volume baixo não obtiveram sucesso sob a Alternativa 2 de cooperação *fuzzy*, considerando-se o atraso na via arterial.

A utilização do controlador *fuzzy* na rede piorou os resultados de percentual de paradas veiculares para a via arterial na rede 111 sob volume alto e para todas as arquiteturas sob

volume baixo. Para a rede 111 sob volume alto uma alternativa de peso trouxe uma melhoria muito discreta, conforme pode ser observado na Tabela 5.11. As demais arquiteturas sob o volume alto e controle *fuzzy* convencional apresentaram bons resultados de redução do percentual de paradas veiculares, sendo suficiente para melhorar a fluidez na arterial quando comparado com os resultados do controle fixo coordenado. A Alternativa 1 trouxe melhorias significativas para a via arterial porém causando prejuízos no conjunto de vias secundárias. No entanto, foi possível identificar valores de pesos onde esse prejuízo para a via secundária é evitado (ver em “Comparação Fuzzy A1(a) nas Tabelas D-4 a D-6) mantendo ainda melhoras no desempenho da via arterial. Essa é a situação apresentada na Tabela 5.11. Já a alternativa 2 conseguiu estabelecer uma melhoria no percentual de paradas da via arterial em até 30% sem causar prejuízos excessivos para o conjunto de vias secundárias.

Para o volume médio os ganhos na fluidez já são visíveis sob a operação *fuzzy* sem o estabelecimento de priorização da via arterial, e com a implementação da Alternativa 1 a redução do percentual de paradas veiculares chega a aproximadamente 50% em relação aos valores obtidos pelo controle fixo coordenado. Com a Alternativa 2 os ganhos permanecem similares aos obtidos sem a cooperação para as redes 131 e 313, para a rede 333 os resultados são similares aos obtidos pela Alternativa 1.

Conforme já mencionado, na operação com volume baixo o controle *fuzzy* convencional na rede aumentou o percentual de paradas na via arterial, porém reduziu significativamente essa medida no conjunto de vias secundárias. Nos testes realizados com a Alternativa 1 foi possível observar redução do percentual de paradas veiculares em até 37%, porém, mantendo os seus níveis para o conjunto de secundárias similares aos observados para o controle fixo coordenado. A alternativa 2 não trouxe ganhos expressivos para esse caso, porém é relevante observar que houve melhoria deste caso em relação ao alcançado pelo controlador *fuzzy* sem o estabelecimento de cooperação para a operação em rede.

Tabela 5.11 Diferença percentual entre percentual de paradas médio obtido pelas alternativas de controle *fuzzy* em relação ao controle fixo coordenado

Volume Alto						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	17%	-3%	3%	0%	-	-
131	-7%	-1%	-7%	-1%	-8%	-1%
313	-11%	-2%	-11%	-2%	-14%	0%
333	-26%	-1%	-26%	-1%	-30%	3%

Volume Médio						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	-15%	-13%	-48%	-2%	-	-
131	-21%	-15%	-48%	-2%	-21%	-15%
313	-17%	-15%	-48%	0%	-18%	-15%
333	-14%	-15%	-46%	0%	-40%	-2%

Volume Baixo						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	7%	-26%	-24%	-1%	-	-
131	4%	-25%	-37%	-1%	3%	-22%
313	10%	-25%	-36%	-2%	1%	-22%
333	13%	-25%	-35%	-2%	-21%	-11%

As paradas por veículo trazem resultados similares aos obtidos para o percentual de paradas veiculares, ressaltando que para o volume alto a melhor alternativa para o controle da rede 111 deu-se pela Alternativa 1, enquanto que para as demais arquiteturas a Alternativa 2 apresentou resultados discretamente melhores para a via arterial (Tabela 5.12).

Embora o controle *fuzzy* sem o estabelecimento de priorização para a via arterial tenha apresentado reduções expressivas para as paradas por veículo para o volume médio, a Alternativa 1 comprova que é possível melhorar esse resultado através da priorização do movimento da via arterial e apresenta resultados com reduções de aproximadamente 50% desta medida em relação ao observado para o controle por tempo fixo.

No volume baixo, em que o controle *fuzzy* convencional não trouxe redução de paradas por veículo para a via arterial, os resultados obtidos pela Alternativa 1 foram expressivos. É adequado ressaltar que a redução em até 37% do número de paradas por veículo não trouxe

prejuízos para o conjunto de vias secundárias quando comparados ao controle fixo coordenado, exceto pelo acréscimo de 1% no caso da rede 333.

Tabela 5.12 Diferença percentual entre a média das paradas por veículo obtido pelas alternativas de controle *fuzzy* em relação ao controle fixo coordenado

Volume Alto						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	2%	-4%	-14%	0%	-	-
131	-17%	-2%	-17%	-2%	-18%	-2%
313	-17%	-2%	-17%	-2%	-20%	0%
333	-30%	-2%	-30%	-2%	-32%	0%

Volume Médio						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	-15%	-14%	-48%	-2%	-	-
131	-22%	-16%	-48%	-2%	-22%	-16%
313	-18%	-17%	-48%	-1%	-19%	-16%
333	-15%	-16%	-47%	-1%	-41%	1%

Volume Baixo						
Rede	Fuzzy/FixCoord		CoopFuz A1/FixCoord		CoopFuz A2/FixCoord	
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec
111	7%	-28%	-25%	-2%	-	-
131	3%	-27%	-37%	-1%	3%	-24%
313	10%	-27%	-37%	0%	1%	-23%
333	13%	-28%	-36%	1%	-22%	-12%

5.3 TÓPICOS CONCLUSIVOS

Os estudos realizados para compor este Capítulo contemplaram a cooperação implícita dos controladores semafóricos *fuzzy* para a priorização do movimento arterial em redes abertas. O controlador *fuzzy* utilizado já vem sendo investigado em diversos estudos voltados à exploração dos elementos que o compõe e seus impactos na resposta do controlador e desempenho do tráfego, aprimoramento do controle em interseções isoladas e agora em redes abertas.

Diante das análises realizadas verificou-se que é possível melhorar a fluidez, algumas vezes já alcançada em função da robustez do controlador *fuzzy*, por meio da atribuição de pesos ao número de veículos detectado na área de controle do controlador semafórico *fuzzy* ou da variação da extensão da área de controle. Destas duas alternativas testadas, a atribuição de pesos apresentou em um quadro mais promissor, uma vez que todos os pesos testados resultaram em redução das medidas de desempenho do tráfego para a via arterial.

A variação da área de avaliação do controlador *fuzzy* apresentou casos com clara priorização do movimento arterial, porém, ocorreram situações em que foram observados apenas prejuízos através das modificações realizadas. É importante ressaltar que esses resultados desfavoráveis ocorreram para as arquiteturas de rede irregulares (rede 131 e rede 313) em que algum trecho permaneceu com a área de controle originalmente definida para o controlador por impossibilidade de ampliação, o que pode ter prejudicado a operação. Para a rede 333 os resultados obtidos foram, para a maioria das vezes, similares aos obtidos com a atribuição de pesos.

Embora muitos dos casos testados tenham apresentado resultados estatisticamente iguais aos obtidos para o controle *fuzzy* sem o estabelecimento das priorizações propostas, ocorreu um número considerável de diferenças estatisticamente significativas. Esse resultado comprova o potencial do estabelecimento da cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, especialmente para os casos de fluxo veicular médio e baixo, que são os mais adequados para a utilização do controle semafórico *fuzzy*.

A utilização dos métodos propostos para priorização de movimento em redes arteriais deve ser precedido de avaliação acerca do objetivo do controle, pois, como pode ser verificado nos resultados apresentados, um dado peso atribuído à via arterial pode apresentar os melhores resultados para atrasos médios, sendo entretanto uma solução intermediária em termos de percentual de paradas veiculares. E ainda, é imprescindível verificar o nível máximo de prejuízo permitido às vias secundárias que compõem a rede, pois, alguns casos de priorização de movimento arterial por cooperação de controladores *fuzzy* podem resultar em prejuízos nas vias secundárias muito superiores aos observados no controle fixo coordenado.

Deve ser ressaltado que aplicação destas alternativas de priorização de movimento arterial deve contemplar estudos de simulação para o adequado estabelecimento dos valores dos pesos ou da área de controle adotados para a via arterial.

Além disso, como é possível definir pesos diferentes para cada aproximação da via principal (resultando em um grande número de combinações possíveis em função do número de interseções da rede) a utilização de técnicas de Inteligência Artificial para a definição do melhor conjunto de pesos é recomendável.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O controle semafórico é uma das principais e mais impositivas alternativas de organização de movimentos veiculares e de pedestres nos centros urbanos. A adequação da sua implantação e, principalmente da sua programação, garantem segurança e fluidez para o tráfego controlado. Estudos voltados à aplicação de novos conceitos e técnicas ao controle semafórico vêm aprimorando os modelos de tomada de decisão inseridos nos controladores, como por exemplo, os que prevêem a utilização da lógica *fuzzy*.

A lógica *fuzzy* tem apresentado elevados graus de sucesso, inclusive comerciais, em aplicações relacionadas a diversas áreas de controle. Os estudos pioneiros voltados à utilização desta técnica de Inteligência Artificial no controle semafórico datam de 1977, e desde então vem sendo desenvolvidos por diferentes pesquisadores em diversos países.

A presente tese apresenta, inicialmente, uma revisão teórica do estado-da-arte dos controladores semafóricos *fuzzy*, com foco nas investigações dos elementos componentes destes controladores. Em seguida, apresenta os estudos referentes à contribuição do presente trabalho de pesquisa: estudos exploratórios de controladores semafóricos *fuzzy* e estudos da operação de redes arteriais utilizando controladores semafóricos *fuzzy*.

Assim, a pesquisa aqui apresentada é composta de dois grandes grupos de estudos exploratórios relacionados aos controladores semafóricos *fuzzy* que atuam sob o princípio da extensão: (i) avaliação de elementos destes controladores e seus impactos na resposta do controlador e no desempenho do tráfego; (ii) operação em rede arterial de CSF. Os resultados promissores garantiram o alcance dos objetivos traçados para a tese em questão e apontam para um grande conjunto de oportunidades de aprimoramento destes controladores.

O Quadro 6.1 traz o resumo dos estudos realizados e os resultados obtidos desta pesquisa em que, os estudos 1 e 2 são parte do grupo de estudos exploratórios (i), e os estudos 3 e 4, do grupo (ii).

Quadro 6.1 Resumo dos estudos desenvolvidos na pesquisa

Estudo desenvolvido	Principais Resultados
1 Cobrimento do Universo de discurso e sobreposição de Conjuntos <i>Fuzzy</i>	A ocorrência de trechos descobertos no universo de discurso e sobreposições irregulares dos conjuntos <i>fuzzy</i> comumente resultantes de ajustes <i>on-line</i> , como por exemplo, os obtidos de sistemas <i>neuro-fuzzy</i> , influenciam na resposta do controlador e no desempenho do tráfego controlado. Destacando que os conjuntos <i>fuzzy</i> devem refletir o conceito linguístico definido pelo especialista, especialmente para controle semafórico, faz-se necessária a utilização de uma ferramenta que limite a amplitude dos ajustes realizados de modo automático nos conjuntos <i>fuzzy</i> , no sentido de evitar grandes deformações sobre os formatos originais destes conjuntos e ainda, a ocorrência de trechos do universo de discurso descobertos. Essa ferramenta ainda não é disponível, porém, estudos voltados a esse objetivo já estão em desenvolvimento e abordam, <i>a priori</i> , o conceito de ϵ - <i>completude</i> (Gonçalves, 2007).
2 Avaliação do impacto de diferentes tipos de Controladores <i>Fuzzy</i> no controle semafórico	Conforme os resultados obtidos, o tipo de controlador <i>fuzzy</i> (Sugeno ou Mamdani) utilizado na concepção de CSF impacta de modo significativo tanto na resposta do controlador como no desempenho do tráfego, sendo também comprovada a interação entre o "volume veicular" e o "tipo de controlador <i>fuzzy</i> " utilizado. Foi ainda possível observar que, para o controle semafórico, o controlador de Sugeno tende a ser mais eficiente que o de Mamdani sob o aspecto das medidas de desempenho do tráfego.
3 Estrutura da base de regras de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i>	São encontrados na literatura controladores semafóricos <i>fuzzy</i> com dois tipos de estruturas de base de regras: base de regras particionada e base de regras unificada. Nos estudos de simulação realizados foi possível verificar uma forte interação entre a "estrutura da base de regras" do controlador e o "volume veicular". E ainda, que para o volume veicular alto as medidas de desempenho para as duas abordagens não foram estatisticamente diferentes. Já para os volumes médio e baixo a maioria dos resultados que apresentaram diferenças estatisticamente significativas indicaram a superioridade dos controladores concebidos com base de regras única. Somado aos resultados numéricos apresentados é válido considerar que a concepção de uma base de regras única é uma atividade menos complexa que o desenvolvimento de uma base de regras particionada, uma vez que ela deve ser estruturada a partir do conhecimento de especialistas.
4 Estudos exploratórios da operação em rede de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i>	Nesta avaliação, os CSF, originalmente concebidos para a operação isolada, foram dispostos em rede e seus resultados de simulação foram comparados aos obtidos para o controle fixo-coordenado. As análises foram realizadas tanto por tipo de via, como de modo global, em que: (a) foi verificado que os CSF são robustos a ponto de estabelecer uma progressão ao longo da via arterial, porém, o controle por tempo fixo ainda traz resultados mais adequados para esse objetivo de controle (controle arterial); (b) os CSF trazem resultados mais vantajosos para rede como um todo, sendo também observado que essa superioridade dá-se, especialmente, devido ao atendimento equilibrado da interseção realizado pelo CSF, o que reduz de modo significativo as medidas de desempenho das vias secundárias quando comparadas a esses resultados para o controle por tempo fixo-coordenado.
5 Aprimoramento da operação em rede de Controladores Semafóricos <i>Fuzzy</i>	Foram propostas duas alternativas para o estabelecimento da cooperação dos CSF na operação em rede aberta. Os resultados comprovaram que é possível melhorar a operação em rede destes controladores, ainda que seja feita a opção de manter o controlador <i>fuzzy</i> inalterado em relação à sua concepção original (cooperação implícita). Das duas alternativas propostas; (A1) atribuição de pesos para a via arterial e (A2) variação da área de avaliação do controlador; a primeira proposta (A1) apresentou resultados mais favoráveis para o estabelecimento da priorização de movimento na via arterial.

6.1 ESTUDOS EXPLORATÓRIOS DE CONTROLADORES SEMAFÓRICOS FUZZY

Com o propósito de contribuir com a série de estudos relacionados aos elementos que compõem os controladores semafóricos *fuzzy* (Pedrycz, 1994; Jacques *et al.*, 2002b, 2002c, 2003; Vaz, 2006) e dar continuidade à busca de formas de ajuste *on-line* dos conjuntos *fuzzy* destes controladores (Bingham, 1998; De Re, 1995; Andrade, 2004), a primeira parte da tese apresenta três estudos exploratórios, cujos resultados e limitações são apresentados neste tópico.

6.1.1 Estudo do impacto de sobreposições dos conjuntos *fuzzy* no controle semafórico

Uma vez verificado o benefício potencial da realização de ajustes nos conjuntos *fuzzy* em função das condições do tráfego por meio da seleção dinâmica de planos *fuzzy* proposta por Andrade (2004), passou-se para a investigação de ferramentas para a implementação desta alternativa de forma ampla, automática e em tempo real. De acordo com a revisão de literatura sobre estudos relacionados ao tema, a ferramenta mais indicada para a realização dos ajustes requeridos é baseada em sistemas híbridos do tipo *neurofuzzy*. Dos dois principais estudos disponíveis acerca de ajustes dos conjuntos *fuzzy* de controladores semafóricos (Bingham, 1998; De Re, 1995), o trabalho de Bingham (1998) permite uma análise mais profunda acerca dos aspectos positivos e negativos relacionados a este tema. Assim, avaliando os resultados alcançados neste trabalho foi possível identificar conjuntos *fuzzy* com trechos do universo de discurso em aberto após os ajustes realizados pelo sistema *neurofuzzy* utilizado, o que pode ter sido um dos fatores do resultado não satisfatório apresentado pela autora.

Nesta tese foi então proposta uma investigação acerca dos impactos na resposta do controlador e no desempenho do tráfego em função de diferentes sobreposições dos conjuntos *fuzzy* do controlador semafórico. Para tanto foram testadas oito (8) alternativas de controladores compostos a partir de ajustes realizados manualmente sobre os conjuntos *fuzzy* buscando combinações diferentes do utilizado convencionalmente (grau de sobreposição entre 25% e 75%, simetria das funções e uniformidade na distribuição das variáveis no recobrimento do universo de discurso), e que se assemelhassem às modificações observadas no ajuste *neurofuzzy* obtidos no trabalho de Bingham (1998).

Os ajustes realizados nos limites das funções de pertinência trouxeram modificações significativas na superfície de controle e, por conseguinte, na resposta do controlador. Em

geral, as superfícies tornaram-se irregulares, com platôs e baixadas que representam mudanças bruscas na resposta (extensão de verde) para pequenas modificações nas entradas (fila e chegada). Este padrão de mudança na resposta dos controladores implantados em campo pode resultar em instabilidade do sistema comprometendo sua eficiência e confiabilidade. Em relação ao desempenho do tráfego testado a partir de simulações, as medidas de desempenho mostraram que o tráfego é sensível às modificações na resposta do controlador. As variações observadas chegaram a 19% para as vias secundárias e 16% para as aproximações das vias principais.

Outro aspecto relevante relacionado ao formato final dos conjuntos *fuzzy* é relativo à interpretação destes conjuntos pelo especialista. Para a concepção dos controladores *fuzzy* parte-se do princípio básico que estes devem refletir o conhecimento e os objetivos de controle de especialistas. Se os ajustes realizados resultarem em conjuntos com formatos e sobreposições muito irregulares, o especialista perde a referência na interpretação lingüística dos conjuntos resultantes. Diante do exposto verifica-se a necessidade da busca de um mecanismo de ajuste automático dos conjuntos *fuzzy* dos controladores semaforicos que resulte em: (i) conjuntos conceitualmente coerentes com a sua definição lingüística inicial, ou seja, sem deformações exageradas que descaracterize o conceito lingüístico original; e (ii) respostas coerentes do controlador ao ambiente de controle.

Uma vez que os ajustes realizados nos conjuntos *fuzzy* através dos sistemas *neurofuzzy* disponíveis são realizados a partir de processos matemáticos de busca, a maioria dos ajustes realizados resulta em conjuntos *fuzzy* totalmente descaracterizados em relação ao conjunto inicial. Para evitar deformações nestes padrões seria necessária a inserção de restrições relativas a deformações e sobreposição dos conjuntos *fuzzy*. De acordo com a revisão de literatura realizada, ainda não está disponível nenhum sistema *neurofuzzy* que contenha qualquer elemento restritivo aos ajustes realizados. Atualmente há estudos em andamento envolvendo o conceito de *epsilon-completude*, que busca garantir um percentual de sobreposição para os conjuntos *fuzzy* em sistemas *neurofuzzy* (Gonçalves, 2007). Sendo assim, a continuidade das pesquisas voltadas à aplicação de sistemas *neurofuzzy* para o ajuste *online* dos conjuntos *fuzzy* dos controladores semaforicos fica vinculada ao sucesso desses estudos.

6.1.2 Estudos complementares à estrutura de controladores semafóricos *fuzzy*

(a) Tipos de controladores *fuzzy*

O conhecimento dos impactos que os elementos dos controladores causam tanto na resposta do controlador quanto no desempenho do tráfego controlado é fundamental para o adequado desenvolvimento do controlador aos objetivos de controle delineados pelo gestor do trânsito.

Trabalhos relacionados à comparação dos dois principais tipos de controladores *fuzzy* aplicado ao controle semafórico não foram localizados na literatura, tendo sido definido como um dos elementos explorados nesta pesquisa. Para estabelecer o comparativo desejado foram definidos três controladores a partir do controlador básico do tipo Mamdani, já em estudo por Jacques *et al.*, (2002b, 2002c, 2003), Andrade, (2004) e Vaz (2006), compondo um grupo de dois controladores de Mamdani e dois de Sugeno. As análises foram realizadas sob o aspecto da resposta do controlador e do desempenho do tráfego. A resposta do controlador analisada pela sua superfície de resposta evidencia as diferenças em termos da extensão de tempo de verde, especialmente para valores extremos de fila e chegada veicular. De modo geral as extensões de tempo de verde dadas pelo controlador de Sugeno tendem a ser menores que as obtidas pelo seu par do tipo Mamdani, o que deve resultar em tempos de verde e comprimentos de ciclo menores para aquele tipo de controlador. Essa hipótese foi confirmada pelos resultados de “verde médio” e “comprimento de ciclo” obtidos dos estudos de simulação realizados para estes controladores. Ao analisar o desempenho do tráfego através dos resultados das medidas de desempenho obtidas de simulações, foi possível verificar que o controlador de Sugeno foi mais eficiente no estabelecimento do controle semafórico, especialmente para o volume veicular alto. Sob volume médio, a maior parte dos resultados não foi estatisticamente diferente para ambos os tipos de controladores, porém os resultados estatisticamente diferentes apontaram as vantagens dos controladores de Sugeno. Para o volume baixo foi observado que o controlador de Sugeno tende a beneficiar a via secundária, o que pode trazer prejuízos para a via principal e conseqüentemente para a interseção.

Assim, este estudo deixou evidente que o tipo de controlador impacta tanto na resposta do controlador quanto no desempenho do tráfego, e ainda, a existência de interação entre “volume veicular” e “tipo de controlador” *fuzzy*.

(b) Estrutura da base de regras dos controladores semafóricos fuzzy

Dentre os controladores semafóricos *fuzzy* descritos na literatura é possível observar a utilização de duas estruturas distintas de base de regras do módulo de tomada de decisão *fuzzy*: base de regras única (Favilla *et al.*, 1993; Andrade e Jacques, 2005) e base de regras particionada (Pappis e Mamdani, 1977; Niittymäki, 1998).

Ao avaliar a complexidade que envolve o projeto de um controlador *fuzzy* é razoável considerar que estruturar uma base de regras particionada, ou seja, com subgrupos de regras que são acionados em diferentes momentos do processo de controle, é relativamente mais complexo que definir um conjunto único de regras válidas para qualquer momento da ação do controlador. Nesse sentido, e ainda, com o intuito de verificar o impacto que a estrutura da base de regras causa na resposta do controlador e no desempenho do tráfego, foi delineado um estudo destinado à comparação de controladores *fuzzy* estruturados com base de regras única e particionada.

Os controladores semafóricos *fuzzy* utilizados no estudo são controladores já empregados em estudo disponíveis na literatura e similares entre si em relação às variáveis de entrada e de saída. Para a avaliação proposta foram utilizados o controlador de Niittymäki (1998), representando o controlador de base particionada em cinco subgrupos de regras, e o controlador desenvolvido por Andrade e Jacques (2005), como o controlador de base única. Do controlador de Niittymäki, foram selecionados três subgrupos para compor novos controladores de base única, que foram também considerados no estudo.

A comparação dos controladores foi realizada a partir de medidas de desempenho do controlador (tempo médio de verde e tempo médio de ciclo) e do tráfego (atraso médio e percentagem de paradas veiculares).

Avaliando a resposta dos controladores para as condições testadas obteve-se tempos de verde e comprimentos de ciclo do controlador de base única, até 13% menores em relação aos obtidos pelo controlador de base particionada (para o volume veicular alto). Para o volume baixo o resultado foi contrário, ou seja, o controlador de base particionada resultou em tempos semafóricos menores que os gerados pelo controlador de base de regras única. Esse resultado remete à verificação, e comprovação estatística, da interação entre “*volume*” e “*estrutura da base de regra*”.

O desempenho do tráfego quando analisado para o volume veicular alto testado, resultou em diferenças não significativas estatisticamente. Já para os volumes médio e baixo

ocorreram casos com diferenças significativas, sendo que desses a maioria aponta vantagens para o controlador de base particionada. Conforme mencionado no Capítulo 3, dos 27 testes realizados, 37% apresentaram diferenças não significativas. Dos 17 resultados com diferenças significativas, 71% foram indicativas da superioridade do controle de base de regras única em relação ao controlador de base de regras particionada.

Assim, o estudo comparativo desenvolvido permitiu verificar que os controladores concebidos com base de regras única podem resultar em desempenhos do controle do tráfego similares ou melhores que os estabelecidos por controladores mais complexos estruturados com base de regras particionada. Estes resultados somados à complexidade que pode envolver o desenvolvimento de uma base de regras particionada, apontam para a concepção de base de regras única como uma alternativa mais viável para implementação de controladores semafóricos *fuzzy*, sem perda da qualidade do controle do tráfego.

6.2 ESTUDOS DA OPERAÇÃO DE REDES ARTERIAIS UTILIZANDO CONTROLADORES SEMAFÓRICOS *FUZZY*

Diante dos resultados promissores já obtidos em diversos estudos realizados utilizando a lógica *fuzzy* para estruturar controladores semafóricos, e especialmente em função do nível de detalhamento alcançado nas investigações relacionadas aos controladores semafóricos *fuzzy* que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, viu-se a necessidade de avançar nas aplicações deste controlador para a operação semafórica em rede.

Nesse sentido foi proposto um conjunto de estudos exploratórios voltados, inicialmente, à avaliação do desempenho do tráfego em uma rede arterial composta de 4 semáforos, operados com controladores *fuzzy* desenvolvidos para a operação isolada.

Em função dos resultados obtidos nestes estudos, foi então realizada uma investigação acerca de duas propostas de cooperação dos CSF para verificar o potencial de melhoria no controle em rede.

7.2.1 Estudos exploratórios da operação de redes com controladores semafóricos *fuzzy*

Os estudos propostos nesta etapa do trabalho contemplaram a avaliação de quatro arquiteturas de redes semafóricas arteriais compostas de quatro semáforos, operando sob três níveis de volume de tráfego. Foram, portanto, realizadas simulações para cada caso considerado para dois tipos de controle semafórico para fins de comparação e análise: controle por tempo fixo coordenado e controle atuado do tipo *fuzzy*. As análises foram realizadas tanto para medidas de desempenho do tráfego (atraso médio, percentual de

paradas veiculares e número de paradas por veículo) e para as análises por tipo de via foram também utilizadas medidas de desempenho do controlador (tempo médio de verde).

O estudo constou de avaliações globais, ou seja, do desempenho do tráfego para a rede como um todo. Nessa análise foi possível verificar que o tráfego controlado pelos CSF apresentou resultados tão bons e, na maioria dos casos melhores, que os obtidos pelo controle por tempo fixo coordenado, embora aqueles controladores não sejam desenvolvidos para esse tipo de operação (em rede). Para o volume alto, que apresentou os principais ganhos para o controle *fuzzy*, pode ser observado situações de redução de aproximadamente 36% em termos de atraso médio obtidos com o controle *fuzzy* em relação ao controle fixo-coordenado. Tal resultado é facilmente compreendido quando são realizadas as análises por tipo de via em que é possível visualizar os ganhos significativos obtidos pelo controlador *fuzzy* para as aproximações secundárias da rede. Por exemplo, no volume baixo, os ganhos relativos em atraso médio obtidos na via arterial são abaixo de 10% para todas as arquiteturas de rede, e para a via secundária permanecem na casa dos 25%. Para o volume alto, os ganhos na via arterial são mais expressivos, mantidos numa média de 22%, enquanto que para as vias secundárias chegam a quase 30%.

Os resultados obtidos por tipo de via viabilizaram a verificação da robustez do controlador *fuzzy* utilizado, uma vez que as medidas de desempenho do tráfego e do controlador retrataram sua capacidade adaptativa para o padrão de chegada em pelotão, característico dos corredores arteriais. Outro aspecto relevante é a comprovação da influência da configuração da rede na resposta do controlador e no desempenho do tráfego. Esse resultado fica evidente na comparação entre as redes 333 e 111, e justifica os esforços realizados na busca de alternativas de cooperação de controladores semafóricos *fuzzy* que considerem o distanciamento das interseções da rede arterial.

6.2.2 Aprimoramento da operação de rede arterial utilizando controladores semafóricos *fuzzy*

Nesta etapa do estudo foram então propostas duas alternativas para o estabelecimento da cooperação entre os controladores semafóricos *fuzzy*, originalmente desenvolvidos para a operação isolada e que operam sob o princípio da extensão do tempo de verde, para controlar uma rede arterial. Como o controlador *fuzzy* utiliza informações do ambiente para a tomada de decisão dos tempos de verdes, as alternativas de cooperação atuam no sentido de modificar o cenário real com vistas a beneficiar o movimento na direção desejada, neste

caso, o movimento da via arterial. Assim, a Alternativa 1 propõe a utilização de pesos associados ao número de veículos dispostos na aproximação principal de cada interseção da rede, e a alternativa 2 propõe a ampliação da área de avaliação do controlador *fuzzy* nas aproximações da via arterial.

A Alternativa 2 resultou, por vezes, em resultados piores que os obtidos sem o estabelecimento de medidas para priorização do movimento na via arterial, e comparado ao desempenho da Alternativa 1, mostrou-se menos eficiente para o objetivo proposto. Por outro lado, a Alternativa 1 resultou em medidas de desempenho tão boas e em muitos casos melhores que as obtidas para a operação da rede sob o controle *fuzzy* convencional, ou seja, sem priorização do movimento da via arterial.

Em função de características da concepção do controlador *fuzzy* utilizado neste estudo foi previsto que, para a operação sob volumes veiculares altos, os ganhos em desempenho do tráfego poderiam não alcançar as melhorias esperadas para os volumes médio e baixo. Tal hipótese foi confirmada, especialmente na análise realizada para a rede como um todo. Para as análises realizadas por tipo de via, em que é possível visualizar as vantagens para a via arterial em paralelo com o prejuízo resultante para as vias secundárias, observou-se que na maioria dos casos avaliados, a utilização dos pesos resultava em vantagens significativas para a operação da via arterial. Os ganhos, para os volumes médio e baixo, chegam até 30% em relação à operação *fuzzy* sem a utilização de pesos, e os prejuízos das vias secundárias chegaram a até 80%.

Ao realizar uma análise comparativa destes resultados aos obtidos no estudo exploratório que contemplou simulações destas redes para o controle por tempo fixo e coordenado, foi possível verificar que as medidas de desempenho das vias secundárias para ambos os casos foram, em geral, similares. Assim, foi realizada uma avaliação acerca da possibilidade de manutenção da melhoria alcançada pela cooperação dos controladores semafóricos *fuzzy* para a via arterial sem, no entanto, prejudicar o conjunto de vias secundárias em níveis superiores aos já observados para o controle por tempo fixo coordenado. Foi, então, possível comprovar essa possibilidade e verificar que a cooperação dos controladores *fuzzy* utilizando a associação de pesos pode resultar em melhorias significativas para o movimento da via arterial sem penalizações exacerbadas para as vias secundárias.

Desse modo, os resultados obtidos apontam o potencial da Alternativa 1, especialmente pela possibilidade de determinação de pesos diferenciados para cada interseção da rede em

função da distância entre as interseções, o que pode trazer ainda mais vantagens, além das observadas neste estudo, para a operação em rede utilizando os controladores semafóricos *fuzzy*.

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As dificuldades e sucessos que envolvem o processo de pesquisa sempre trazem questionamentos adicionais aos tratados no estudo. Esta seção apresenta os principais tópicos que são considerados “abertos” e que ficam como sugestões para pesquisas futuras.

1) Uma vez que os simuladores apresentam diversas limitações na representação da realidade, é relevante demandar esforços no sentido de minimizar essas limitações. Para tanto, uma recomendação é comparar os resultados obtidos por simuladores, assumindo volumes veiculares constantes e variáveis ao longo da hora, com medidas de desempenho obtidas em campo para verificar se há vantagens na utilização do volume veicular variável no processo de simulação.

No estágio inicial dos estudos apresentados no Capítulo 4, foi realizada uma avaliação acerca do impacto de utilização de volumes veiculares médio *versus* volumes veiculares variáveis (taxas para cada cinco minutos ao longo de uma hora de simulação). Os testes estatísticos realizados comprovaram a ocorrência de resultados estatisticamente diferentes, e que, embora seja usual a utilização de valores médios para os estudos de simulação, a utilização de dados mais detalhados pode trazer diferenças significativas nos resultados das análises.

Assim, considera-se relevante a realização de estudos complementares acerca da utilização do volume veicular médio variável nas simulações. Sua utilização pode estar vinculada ao propósito da simulação (p.ex. a implantação de um sistema de controle em campo) ou à complexidade que envolve o ambiente em estudo. A avaliação dos ganhos nesses resultados pode apontar para a necessidade de utilização de dados mais detalhados, justificando o esforço e custos associados para a obtenção desses dados.

2) Os resultados obtidos dos estudos voltados à utilização de pesos associados à via arterial apontam para perspectivas mais eficientes voltadas à cooperação dos controladores para o propósito de promoção de fluidez na rede arterial. Uma vez que tenha sido verificado o impacto da arquitetura da rede no desempenho do tráfego, a utilização de pesos diferentes para cada interseção pode ser uma alternativa que melhore os resultados obtidos no estudo

em que foram utilizados sempre os mesmos pesos para a rede, independente do espaçamento entre as interseções consecutivas. A dificuldade de busca da melhor combinação de pesos para o estabelecimento do controle da rede, neste caso, estará associada ao número de interseções que compõe a rede. Assim, para redes formadas por muitas interseções, a utilização de mecanismos de busca, tais como os Algoritmos Genéticos, pode trazer resultados promissores no aspecto da definição de pesos diferenciados para cada aproximação da rede arterial.

3) A proposta de pesos apresentada no Capítulo 5 para efeito de cooperação de controladores *fuzzy* pode ter uma aplicação mais ampla, além do estabelecimento da fluidez em redes arteriais. Um exemplo é a operação de tráfego misto, que é uma situação freqüente em centros urbanos. Nesses casos, se em uma aproximação controlada por controladores semafóricos *fuzzy*, por exemplo, 50% dos veículos são pesados, a contagem do “número de veículos” nos 100 metros da área de avaliação será inferior ao caso em que 0% dos veículos são pesados. Porém, esses veículos necessitariam da mesma extensão de verde para cruzar a interseção. Assim, nesse caso, é necessário que as entradas no controlador *fuzzy* sejam expressas em termos de veículos-equivalentes e não de veículos. Essa transformação pode feita por um “peso” que represente a composição do tráfego em cada aproximação. A utilização de pesos pode ser também usada nos casos de priorização de veículos de transporte em massa. Assim a equivalência seria definida em termos do número de usuários por veículo e o peso seria calculado de modo a representar esta equivalência (Equação 6.1).

$$Peso = \frac{\sum n_Veículos_Tipo_i \times FatorEquivalência_i}{\sum n_Veículos_Tipo_i} \quad \text{Eq. 6.1}$$

Exemplo: 1000 veículos e 300 caminhões; sendo $Ef_{veículo}=1$, $Ef_{caminhão}=2$.

$$Peso = \frac{(1000 \times 1) + (300 \times 2)}{1000 + 300} = 1,23$$

Assim, o desenvolvimento de estudos envolvendo outras perspectivas para a utilização de pesos no controle semafórico *fuzzy* é também recomendável.

4) A proposta inicial de cooperação dos controladores semafóricos *fuzzy*, e que foi apresentada nesta tese, aborda a cooperação implícita, em que os controladores tomam as decisões relativas à extensão do tempo de verde considerando unicamente os dados

relativos à sua interseção. No entanto, é viável e recomendável continuar as investigações, também voltadas ao desenvolvimento de métodos de cooperação explícita, para controladores semafóricos *fuzzy* que operem sob o princípio da extensão de tempo de verde.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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 e Ambiental, Universidade de Brasília, p. 137.
- Andrade, M.; Jacques, M. A. P.(2006) “Estudo para Aprimoramento da Operação de Controladores Semafóricos Fuzzy”. In: *Confederação Nacional do Transporte; Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes*. (Org.). Transporte em Transformação X. 1 ed. Brasília: LGE Editora Ltda, 2006, v. v. 01, p. 79-95.
- Austroroads (2003) *Guide to Traffic Engineering Practice: Part 7. Traffic Signals*. 3th ed.
- Bazzan, A. L. C. (2005) “A Distributed Approach for Coordination of Traffic Signal Agents.” In: *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, Vol.10, p.131-164.
- Bingham, E. (1998) *Neurofuzzy Traffic Signal Control*. Thesis. Department of Engineering Physics and Mathematics. Helsinki University of Technology.
- Bogenberger, K. e Keller, H. (2001) “An Evolutionary Fuzzy System for Coordinated and Traffic Responsive Ramp Metering.” In: *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences*.
- Bogenberger, K., Keller, H. e Vukanovic, S. (2001) “A Neuro-Fuzzy Algorithm for Coordinated Traffic Responsive Ramp Metering.” In: *IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings*. Oakland (CA), USA.
- Bonetti Jr, W. e Pietrantonio, H. (2006) *Utilização de Semáforos Atuados pelo Tráfego*. Disponível em: www.sinaldetransito.com.br , acessado em: 5/ago/2008.
- CAMUTCD (2003) California Manual on Uniform Traffic Control Devices (CAMUTCD) for Streets and Highways, PART 4: Highway Traffic Signals. 132p.
- Chiu, S. e Chand, S. (1993) “Self-organizing traffic control via fuzzy logic.” In: *Decision and Control, 1993.*, Proceedings of the 32nd IEEE Conference on, Vol.2, 15-17, San Antonio, TX, USA, p. 1897-1902.
- Choy, M.C., Srinivasan, D. e Cheu R.L. (2003) Cooperative, Hybrid Agent Architecture for Real-Time Traffic Signal Control. In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, PART A: Systems and Humans*, Vol: 33, No. 5, p. 597-607.
- De Re, A. (1995) *Sistemas Conexionistas Adaptativos aplicados a problemas de Controle de tráfego*. Dissertação de Mestrado. Florianópolis-SC.
- DENATRAN (1984) *Manual de Semáforos*. Coleção Serviços de Engenharia. 2ª Ed., Brasília: DENATRAN.
- DNIT (2005) *Manual de Projetos de Interseções*. IPR. Publ., 718. 2ª Ed. Rio de Janeiro: DNIT.

- Dunker, J., Scherer, A. e Schlageter, G. (1992) “Integrating Neural Networks Into Distributed Knowledge Based Systems”, In: *Proc of 12th conf. On AI, Expert Systems and Natural Language*, Avignon, France, 1992.
- Favilla, J., Machion, A. e Gomide, F. (1993) “Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies.” In: *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vol 1, San Francisco.
- FHA (2009) *Traffic Control Systems Handbook*, U.S. Department on Transportation, Federal Highway Administration. Disponível em: <http://www.fhwa.dot.gov>, acessado em: 15/08/1007.
- Gipps, P.G. (1981). A Behavioural Car-Following Model for Computer Simulation. *Transportation Research*, Vol. 15B(2), p. 105-111.
- Gipps, P.G. (1986). A model for the Structure of Lane-Changing Decisions. *Transportation Research*, Vol. 20B(5), p. 403-414.
- Gonçalves, H. I. V. (2007) Um Estudo sobre a ϵ -completude em Sistemas Neuro-Fuzzy. *Documento apresentado para Exame de Qualificação do Curso de Mestrado em Informática do CIC/UnB*. Brasília.
- Grégoire, P.-L., C. Desjardins and B. Chaib-Draa (2007) Urban Traffic Control Based on Learning Agents. In: *Intelligent Transportation Systems Conference – ITSC*.
- Hair Jr., J. F.; W. C. Black; B. J. Babin; R. E. Anderson e Ronald L. Tatham (2009) *Análise Multivariada de dados*. Tradução de Adonai Schlup Sant’Ana. – 6ª Ed. – Porto Alegre: Bookman, 2009.
- Jacques, M. A. P.; D. B. L. M. Santos, M. Pursula e I. Kosonen (2003) “Studying the Importance of Fuzzy Sets Definitions for Fuzzy Signal Controllers.” In: *Fourth International Symposium on Uncertainty Modeling and Analysis – INSUMA*. Maryland, USA, p. 64 – 69.
- Jacques, M.A.P., J. Niittymäki, e M. Pursula (2002a) “Analysing Different Fuzzy Traffic Signal Controllers for Isolated Intersections.” Paper accepted for presentation at *TRB 81st Annual Meeting*. January 13-17. 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 13th Mini-Euroconference*. 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.
- Kikuchi, S. (1991) “Aplication of fuzzy set theory to the analysis of transportation problems.” In: *Second International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Enginering*. Minneapolis, Minnesota, August 18-21.

- Kim, J. (1997) "A fuzzy logic control simulator for adaptive traffic management." *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Volume 3, Issue , 1-5 Jul 1997 Page(s):1519 - 1524 vol.3.
- 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.
- Lee, C. C. (1990a) "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part I." In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, p. 404 – 418.
- Lee, C. C. (1990b) "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II." In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 20, No. 2, p. 419 – 435.
- Lee, J-H. e Kwang, H.L.- (1999) "Distributed and Cooperative Fuzzy Controllers for Traffic Intersections Group." In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Part C: Applications and Reviews, Vol. 29, No. 2.
- Li, Y.; Wu, R. e Li, W. (2004) "The Coordination Between Traffic Signal Control Agents Based on Q-Learning." In: *Proceedings of the 5m World Congress on Intelligent Control and Automation*. Hangzhou, P.R. China. p.2690- 2693.
- Lowrie, P. R. (1992) *SCATS - Sydney Co-Ordinated Adaptive Traffic System. A Traffic Responsive Method of Controlling Urban Traffic*. RTA, Australia.
- Mamdani, E.H. e Assilian, S. (1975) "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." In: *Int. J. Man-Machine Studies*, vol. 7, p. 1-13.
- Martin, P. T., Perrin, J., Chilukuri, B. R., Jhaveri, C., Feng, Y. (2003) *Adaptive Signal Control II*. Department of Civil and Environmental Engineering, University of Utah Traffic Lab, EUA.
- MATLAB (2008) *Getting Starter Guide*. The MathWorks, Inc.
- Murat, Y. S. e Gedizlioglu, E. (2002) "A New Approach for Fuzzy Traffic Signal Control." In: *Proceedings of the XIII Mini-EURO conference on "Handling Uncertainty in the Analysis of Traffic and Transportation Systems"*. Polytechnic of Bari, Italy; p. 174-180.
- Murat Y. S. e Gedizlioglu, E. (2005) "A fuzzy logic multi-phased signal control model for isolated junctions." In: *Transportation Research*, Part C, Vol 13, p.19-36.
- 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 9th Triennial World Congress*, Pergamon Press, Oxford, UK, p. 2865-2870.

- Nauck, D., R. Kruse e R. Stellmach (1995). New Learning Algorithms for the Neuro-fuzzy Environment NEFCON-I. In: *Proceedings of the Third German GI-Workshop "Fuzzy-Neuro Systeme'95"*. Darmstadt, Germany, November 15-17, 1995.
- Niittymäki J. (2001) "Installation and Experiences of Field Tests of a Fuzzy Signal Controller." In: *European Journal of Operational Research*, Vol. 131/2. p. 45-53.
- Niittymäki, J. (1999) "Fuzzy Logic Two-Phase Traffic Signal Control for Coordinated One-Way Streets." In: *IEEE Midnight-Sun Workshop on Soft Computing Methods in Industrial Applications*. Kuusamo, Finland. p. 69-74.
- Niittymäki, J. (1998) *Isolated Traffic Signals – Vehicle Dynamics and Fuzzy Control*. Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering. Helsinki University of Technology.
- Niittymäki, J. e Nevala, R. (2001). "Fuzzy Adaptive Traffic Signal Control – Principles and Results". In: *Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIS International Conference*, Vancouver, Canada, 6p.
- Niittymäki, J. e Pursula, M. (2000) "Signal Control Using Fuzzy Logic". In: *Fuzzy Sets and Systems*, 116, p.11-22.
- Oliveira, D., Bazzan, A. L. C., Silva, B.C.da e Ferreira Junior, P.R. (2005) "Coordenação dinâmica de semáforos: dois casos de estudo." In: *XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*. São Leopoldo/RS.
- Pappis, C. P. e Mamdani, H. (1977) "A Fuzzy Logic Controller for Traffic Junctions." In: *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*. Vol. SMC-7, Nº 10.
- Pedrycz, W. (1994) "Why triangular membership functions?" In: *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 64 p.21-30.
- Roess, R.P., Prassas, E. S. e MacShane, W.R. (2004) *Traffic Engineering*. Third Edition. Pearson Prentice Hall: New Jersey.
- Santos, D.B.L.M. (2003) *Procedimento para a Construção dos Conjuntos Fuzzy utilizados em Controladores Semafóricos*. Dissertação de Mestrado, Publicação TU.DM 006A/03, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 109 p.
- Sayers, T., Bell, M.G.H., Mieden, T. e Busch, F. (1996) "Traffic responsive signal control using fuzzy logic-a practical modular approach." In: *Fuzzy Logic Controllers in Practice* (Digest No. 1996/200), IEE Colloquium on Volume , Issue , 15 Nov 1996 Page(s):5/1 - 5/4.
- SDD (1973) *Scottish Development Department – Criteria for Traffic Light Signals at Junctions*. Disponível em: <http://www.standardsforhighways.co.uk/dmrb/vol8/section1/sh6_73.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2008.
- SCOOT 2.4, (1993) *SCOOT Traffic Handbook*. Série scoot 0400-0499. Reference: 666/HB/16101/002. Siemens Plessey Control Limited. Poole.

- Sugeno, M. (1985). *An introductory survey of fuzzy control*. Information Sciences 36, p. 59-83.
- Takagi, T. e Sugeno, M. (1983) “Derivation of fuzzy control rules from human operator’s control action.” In: *IFAC Symposium on Fuzzy Information, Knowledge Representation and Decision Analysis*, Marseille, p. 55-60.
- TRB (2000) *Highway Capacity Manual 2000*. HCM 2000. Transportation Research Board.
- UnB-Sitracs (2009) *Manual _UnB-Sitracs_b1.0*. Disponível em: <http://sourceforge.net/projects/unb-sitracs/files/>, acessado em: 04/outubro/2009.
- Vaz, A.M. (2006) *Estudo das Funções de Pertinência para Conjuntos Fuzzy Utilizados em Controladores Semafóricos*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.
- Vaz, A.M., Oliveira, E.R. de, Jacques, M.A.P. (2005) “Impacto das funções de pertinência na operação de controladores semafóricos fuzzy: estudo exploratório.” In: *XIX ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes*, Recife. Panorama Nacional da Pesquisa em Transportes 2005. Rio de Janeiro : ANPET V. 1. p. 853-862.
- Vilanova, L. M. (2005) *Programação de um semáforo usando o método do grau de saturação*. Disponível em: <http://www.sinaldetransito.com.br> Acessado em: 15/12/2008.
- Webster, F. V. e Cobbe, B. M. (1966) “Traffic Signals”, In: *Road Research Technical Paper No 56*, H.M.S.O.
- Yang, Z., Huang, X., Liu, H. e Xiang, C. (2006) “Multi-phase Traffic Signal Control for Isolated Intersections Based on Genetic Fuzzy Logic.” In: *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.
- Zadeh, L. A. (1973) “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.” In: *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. SMC-3, No. 1, p. 28-44.
- Zadeh, L. A. (2008) “Is there a need for fuzzy logic?” In: *Information Sciences 178*. P. 2751–2779.
- Zimmermann, H.-J. (1996) *Fuzzy Set Theory and Its Applications*. Third Edition. Kluwer Academic Publishers, Boston Dordrecht London.

APÊNDICE A

Tabelas de Extensões *Fuzzy*

Tabela A-1 Extensões *Fuzzy* do Controlador 1

		CHEGADA																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FILA	0	9	20	26	29	30	39	45	51	60	102	119	130	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	1	9	20	26	29	30	39	45	51	60	102	119	130	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	2	9	20	26	29	30	39	45	51	60	102	119	130	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	3	9	20	26	29	30	39	45	51	60	102	119	130	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	4	9	20	26	29	30	39	45	51	60	102	119	130	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	5	9	20	26	29	29	37	44	50	52	92	111	122	133	133	133	133	133	133	133	133	133
	6	9	20	26	27	27	35	41	46	48	86	104	118	129	129	129	129	129	129	129	129	129
	7	9	20	26	25	25	33	41	44	46	82	104	116	126	126	126	126	126	126	126	126	126
	8	9	20	26	25	24	33	41	44	45	82	104	116	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	9	9	20	26	25	25	33	41	44	45	80	103	114	121	121	121	121	121	121	121	121	121
	10	9	20	26	27	27	35	41	43	44	81	100	113	120	120	120	120	120	120	120	120	120
	11	9	20	24	25	25	33	38	40	40	75	97	108	115	115	115	115	115	115	115	115	115
	12	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	13	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	14	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	15	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	16	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	17	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	18	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
	19	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114
20	9	20	23	24	24	32	37	39	39	74	96	107	114	114	114	114	114	114	114	114	114	

Tabela A-2 Extensões *Fuzzy* do Controlador 2

		CHEGADA																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FILA	0	0	8	15	23	30	38	45	53	60	68	75	83	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	1	0	12	18	24	30	40	45	50	60	70	75	80	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	2	0	12	20	25	30	39	45	51	60	69	75	81	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	3	0	12	20	26	30	38	45	53	60	68	75	83	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	4	0	12	20	26	30	38	45	53	60	68	75	83	90	90	90	90	90	90	90	90	90
	5	0	10	17	23	26	33	39	45	56	63	69	75	86	86	86	86	86	86	86	86	86
	6	0	10	15	19	23	30	35	42	53	60	65	72	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	7	0	10	13	15	19	27	33	39	49	57	63	69	79	79	79	79	79	79	79	79	79
	8	0	6	10	13	15	23	30	38	45	53	60	68	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	9	0	4	8	10	13	19	25	30	40	46	52	57	67	67	67	67	67	67	67	67	67
	10	0	4	6	9	12	18	21	28	36	43	47	53	60	60	60	60	60	60	60	60	60
	11	0	3	6	8	11	16	21	25	33	39	44	48	55	55	55	55	55	55	55	55	55
	12	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	13	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	14	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	15	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	16	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	17	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	18	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
	19	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50
20	0	3	6	8	10	15	20	25	30	35	40	45	50	50	50	50	50	50	50	50	50	

Tabela A-3 Extensões *Fuzzy* do Controlador 3

		CHEGADA																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FILA	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
	2	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	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
	4	16	35	44	48	50	64	75	86	100	117	132	146	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
	6	16	35	44	45	45	59	68	76	79	94	107	125	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
	8	16	35	44	42	41	55	68	73	75	90	107	123	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
	10	16	35	44	45	45	59	68	72	73	88	100	115	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
	12	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	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
	14	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	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
	16	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	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
	18	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	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
20	16	33	39	41	41	54	63	65	66	79	94	108	116	116	116	116	116	116	116	116	116	

Tabela A-4 Extensões *Fuzzy* do Controlador 4

		CHEGADA																				
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
FILA	0	0	13	25	38	50	63	75	88	100	113	125	138	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	1	0	20	30	40	50	67	75	83	100	117	125	133	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	2	0	20	33	42	50	64	75	86	100	114	125	136	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	3	0	20	33	43	50	63	75	88	100	113	125	138	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	4	0	20	33	43	50	63	75	88	100	113	125	138	150	150	150	150	150	150	150	150	150
	5	0	17	29	38	44	55	65	75	94	105	115	125	144	144	144	144	144	144	144	144	144
	6	0	17	25	31	38	50	58	70	88	100	108	120	138	138	138	138	138	138	138	138	138
	7	0	17	21	25	31	45	55	65	81	95	105	115	131	131	131	131	131	131	131	131	131
	8	0	10	17	21	25	38	50	63	75	88	100	113	125	125	125	125	125	125	125	125	125
	9	0	7	13	17	22	32	41	50	67	77	86	95	111	111	111	111	111	111	111	111	111
	10	0	6	10	15	20	29	36	46	60	71	79	88	100	100	100	100	100	100	100	100	100
	11	0	6	10	14	18	27	35	42	55	65	73	81	91	91	91	91	91	91	91	91	91
	12	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	13	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	14	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	15	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	16	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	17	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	18	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
	19	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83
20	0	6	10	14	17	25	33	42	50	58	67	75	83	83	83	83	83	83	83	83	83	

APÊNDICE B

Procedimento de cálculo do Tempo de
Ciclo para o Controle Semafórico por
Tempo Fixo para Interseções Isoladas

PROCEDIMENTO DE CÁLCULO DO TEMPO DE CICLO PARA O CONTROLE SEMAFÓRICO POR TEMPO FIXO PARA INTERSEÇÕES ISOLADAS

A determinação dos tempos de ciclos e das frações de verde adotados para o controle por tempo fixo utilizado neste trabalho foi feita utilizando os métodos de Webster e do Grau de Saturação Crítico. O Método de Webster caracteriza-se pela obtenção dos tempos que devem resultar nos atrasos mínimos para a interseção em questão. O tempo de ciclo obtido por esse método é denominado na literatura por Ciclo Ótimo (CO). O Método do Grau de Saturação obtém os tempos semafóricos para um valor definido, e pré-fixado, de grau de saturação para as aproximações controladas.

As interseções deste estudo são compostas por duas aproximações com duas faixas de tráfego cada uma, operando em sentido único e sem movimentos de conversão sendo, portanto utilizadas duas fases semafóricas. A programação adotada segue os limites de tempo de ciclo mínimo e máximo recomendados pelo Manual de Semáforos brasileiro (DENATRAN, 1984) definido pelo intervalo de 30 a 120 segundos.

O procedimento para a determinação dos ciclos adotados nos estudos desenvolvidos neste trabalho está descrito no fluxograma apresentado na Figura B-1.

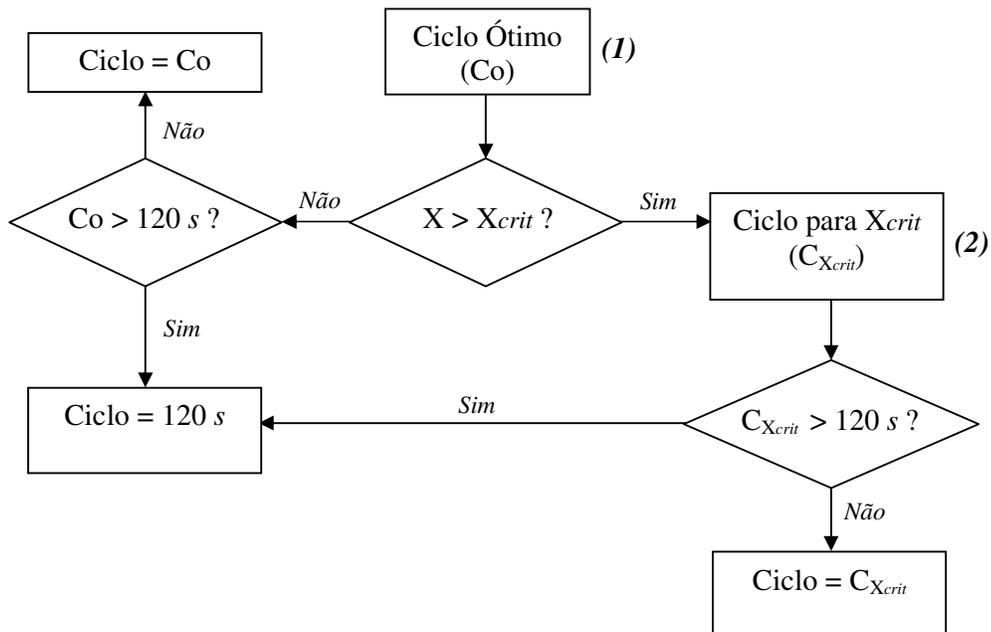


Figura B-1 Fluxograma de cálculo do tempo de ciclo

Para realizar o cálculo do tempo de ciclo pelos dois métodos utilizados neste trabalho é necessário obter inicialmente o Tempo Perdido no ciclo (T) (Eq. B-5). Esse procedimento é apresentado a seguir partindo do cálculo do tempo de Entre Verdes (EV) (Eq. B-1) para a definição dos tempos de amarelo e de vermelho geral.

O Entre Verdes (EV) foi calculado em função das velocidades de operação utilizadas nas simulações, e os Tempo de Amarelo (t_{AM}) e de Vermelho Geral (t_{VG}) definidos a partir do EV , considerando-se os limites de $t_{AM} \geq 3,0$ e $t_{VG} \geq 1,0$ (DENATRAN, 1984 e Austroads, 2003).

$$EV = t_r + \frac{V_D}{2 \cdot 3,6 \cdot a} + 3,6 \cdot \frac{w + L}{V_D} \quad \text{Eq. B-1}$$

Em que:

t_r = tempo de reação [s];

V_D = velocidade desejada ou regulamentada [km/h];

a = desaceleração [m/s^2];

w = largura da interseção [m];

L = comprimento médio dos veículos em circulação [m].

Com base nos valores apresentados na Tabela B-1, foi calculado através da Equação B-1 os valores de Entre Verdes para cada uma das velocidades desejadas. A partir do resultado da equação para cada caso, o EV foi adotado como valor inteiro superior (Tabela B-2).

Tabela B-1 Valores das variáveis para o cálculo dos entre verdes do modelo

Variável	Valor	Justificativa
Tempo de reação (t_r)	1,0 s	DNIT, 2005 e Roess <i>et al.</i> , 2004
Velocidade (V_D)	50, 60, 70 e 80 km/h	Velocidades usuais em áreas urbanas
Taxa de desaceleração (a)	3,5 m/s^2	DNIT, 2005
Largura da interseção (w)	7,0 m	Modelo definido com faixas de 3,5 m de largura
Comprimento dos veículos (L)	9,1 m	DNIT, 2005

Tabela B-2 Valores de Entre Verdes, tempo de Amarelo e de Vermelho Geral para o modelo

Velocidade [km/h]	EV calculado [s]	EV adotado [s]	t_{AM} [s]	t_{VG} [s]
50	4,14	5	4	1
60	4,35	5	4	1
70	4,61	5	4	1
80	4,90	5	4	1

O DENATRAN (1984) recomenda que nos casos em que não é possível levantar o tempo perdido total no cruzamento, adotar este valor como numericamente igual à soma dos tempos de amarelo das fases envolvidas. Esse processo é simplificado e pode ser aplicado para interseções que não tenham a fase de vermelho geral.

A edição 2000 do HCM trata a definição do Tempo Perdido de modo mais criterioso, e indica que o tempo perdido varia em função dos comprimentos de amarelo e de vermelho geral, não sendo adequado utilizar valores fixos para o tempo perdido como é comumente utilizado nas metodologias de cálculo de tempo semaforico. Assim, para aplicar a metodologia do HCM é recomendável utilizar os valores padrões para as variáveis a seguir que compõem o método proposto (Equações B-2, B-3, B-4 e B-5): (a) tempo perdido inicial, e (b) tempo do amarelo e vermelho geral usado pelo motorista. Por esse método, se “ l_1 ” for igual a “ e ”, tem-se que o tempo perdido em cada fase é igual ao tempo de entreverdes. Essa é a situação adotada neste estudo.

$$Se(l_1 = e) \Rightarrow T_{fase} = EV$$

$$l_2 = EV - e \quad \text{Eq. B-2}$$

$$EV = t_{AM} + t_{VG} \quad \text{Eq. B-3}$$

$$T_{fase} = l_1 + l_2 \quad \text{Eq. B-4}$$

$$T = \sum_i^n T_{fasej} \quad \text{Eq. B-5}$$

Em que:

e = tempo do amarelo e do vermelho geral usado pelo motorista, [s/fase]

l_1 = tempo perdido inicial, [s/fase]

l_2 = tempo de limpeza perdido, [s/fase]

T_{fase} = tempo perdido na fase, [s/fase]

T = tempo perdido total (por ciclo), [s]

Ainda, para proceder ao cálculo do tempo de ciclo, obtém-se a Taxa de Ocupação Crítica para as aproximações (Y_i) e a soma da Taxa de Ocupação Crítica (Y). A partir do volume de tráfego (V_i) e do Fluxo de Saturação (S_i) definido para cada aproximação faz-se o cálculo da Taxa de Ocupação (Y_i) para cada uma das aproximações através da Equação B-6.

$$Y_i = \frac{V_i}{S_i} \quad \text{Eq. B-6}$$

O valor de S_i , sempre que possível, deve ser determinado diretamente em campo. Nos casos em que sua medição “*in loco*” não pode ser realizada, seu valor deve ser estimado por meio de modelos especialmente desenvolvidos para esse fim. Um dos modelos mais empregados é o do HCM-2000 (TRB, 2000). No presente estudo foi adotado fluxo de saturação igual a 1800 veículos por hora de verde por faixa.

O valor do Y da interseção é resultado da soma do Y_i para cada uma de suas aproximações que, neste trabalho, é composto por duas aproximações, conforme apresentado na Equação B-7,

$$Y = Y_1 + Y_2 \quad \text{Eq. B-7}$$

B-1 Cálculo do Ciclo Ótimo – Método de Webster

Partindo-se da soma das Taxas de Ocupação críticas (Y) e do Tempo Perdido (T) no ciclo, procede-se o cálculo do Ciclo Ótimo (C_o) pela Equação B-5.

$$C_o = \frac{1,5 \times T + 5}{1 - Y} \quad \text{Eq. B-8}$$

Com base no Ciclo Ótimo calculado, adota-se um tempo de ciclo (em segundos), considerando o intervalo de $30 \leq C \leq 120$ s, recomendado pelo DENATRAN (1984).

Com o tempo de ciclo adotado (C) calcula-se os tempos de verde efetivo para cada uma das aproximações (g_i), conforme apresentado na Equação B-9. O DENATRAN (1984) recomenda o tempo de verde mínimo para cada aproximação em 10 segundos.

$$g_i = \frac{Y_i}{Y} \times (C - T) \quad \text{Eq. B-9}$$

Webster e Cobbe (1966) argumentam que estudos de atraso em função do tempo de ciclo mostram que tempos de ciclo na faixa de 0,75 a 1,50 do tempo de ciclo ótimo produzem atrasos não superiores a 10 – 20% do atraso geral que se obteria com o ciclo ótimo. Esse intervalo de minimização de atraso é relevante para a definição dos tempos de ciclo para interseções coordenadas, as quais devem operar com o mesmo tempo de ciclo.

O método de cálculo do ciclo ótimo e dos tempos de verde acima mencionados produz o mesmo grau de saturação para todas as aproximações da interseção. Esse grau de saturação é determinado pela aplicação das Equações B-10, B-11 e B-12.

$$\lambda_i = \frac{g_i}{C} \quad \text{Eq. B-10}$$

$$c_i = \lambda_i \times S_i \quad \text{Eq. B-11}$$

$$X_i = \frac{V_i}{S_i \times \lambda_i} \quad \text{Eq. B-12}$$

Em que:

λ = Percentagem de Verde

X = Grau de Saturação

c = Capacidade

B-2 Cálculo do Ciclo pelo Grau de Saturação

A partir do valor pré-definido para o Grau de Saturação (X_{crit}), do Tempo Perdido (T) e da soma das Taxas de Ocupação das aproximações (Y), calcula-se o Ciclo Mínimo (C_{min}) através da Equação B-13. Por meio dessa equação, o ciclo calculado produzirá um grau de saturação comum para todas as aproximações da interseção, com valor igual ao X_{crit} .

$$C_{\min} = \frac{X_{\text{crit}} \times T}{X_{\text{crit}} - Y} \quad \text{Eq. B-13}$$

De acordo com o discutido em Vilanova (2005), a teoria recomenda a operação da interseção com Grau de Saturação na faixa de 80% a 90%, pois para esse intervalo foram observados os menores valores de atrasos totais para os semáforos. Para o presente estudo foi adotado o Grau de Saturação de 90% para os cálculos do Ciclo Mínimo.

O cálculo do ciclo pelo grau de saturação também pode ser baseado em grau de saturação diferente para as aproximações da via principal e da via secundária, no caso do projetista considerar que essa diferenciação é desejada (ver Vilanova, 2005).

É importante observar, especialmente para o caso de utilização do Ciclo Mínimo (C_{\min}), se o valor de Ciclo adotado está dentro da faixa de minimização de atraso ($0,75 C_0 \leq C \leq 1,50 C_0$).

Para os casos em que os tempos de verde efetivos obtidos ficam fora dos limites admissíveis, por exemplo, tempos de verde menores que 10 s; torna-se necessário refazer o cálculo do ciclo que deve ser recalculado em função do tempo de verde mínimo (Equação B-14).

Partindo da Eq. B-9:

$$g_i = \frac{Y_i}{Y} \cdot (C - T) \quad \longrightarrow \quad \frac{g_i \cdot Y}{Y_i} = (C - T)$$

$$C = T + \frac{g_i \cdot Y}{Y_i} \quad \text{Eq. B-14}$$

B-3 Resultados obtidos

Os resultados apresentados na Tabela B-3 foram obtidos de acordo com a metodologia anteriormente descrita.

Tabela B-3 Síntese da programação semafórica por nível de volume

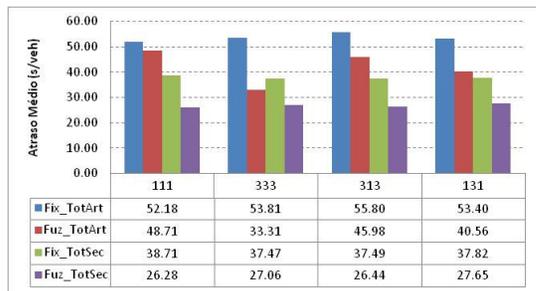
Nível de Volume	Volume		<i>EV</i>	<i>T_{AM}</i>	<i>VG</i>	<i>T</i>	Ciclo	Verde Efetivo		<i>X</i>	
	Princ.	Sec.						Princ.	Sec.	Princ.	Sec.
1	2.200	660	5	4	1	10	95	65	20	0,89	0,87
2	1.600	500	5	4	1	10	52	32	10	0,72	0,72
3	1.200	400	5	4	1	10	50	30	10	0,50	0,50
4	1.200	1.200	5	4	1	10	60	25	25	0,80	0,80

Em que,

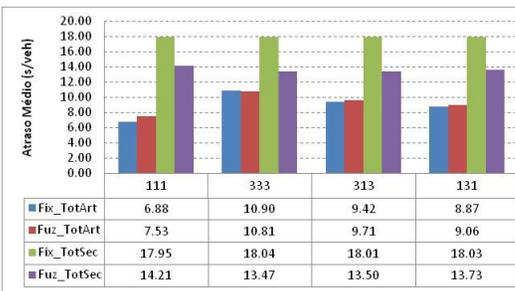
- Volume é dado em veículos/hora.
- Entre Verdes (*EV*), Amarelo (*T_{AM}*), Vermelho Geral (*VG*), Tempo Perdido (*T*), Ciclo e Verde Efetivo, são dados em segundos.
- Grau de Saturação (*X*).

APÊNDICE C

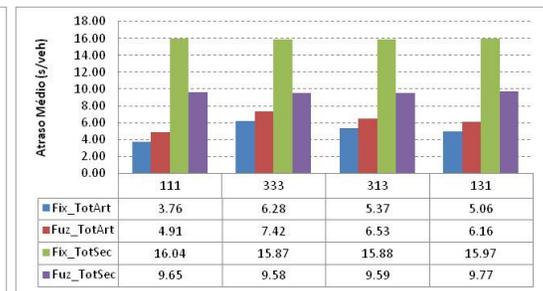
Resultados dos Estudos Exploratórios da
operação em rede do Controle
Semafórico do tipo *Fuzzy*



(a) Volume Alto

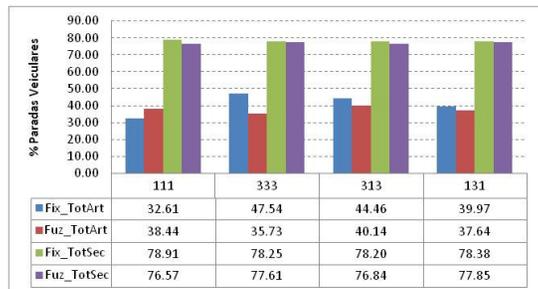


(b) Volume Médio

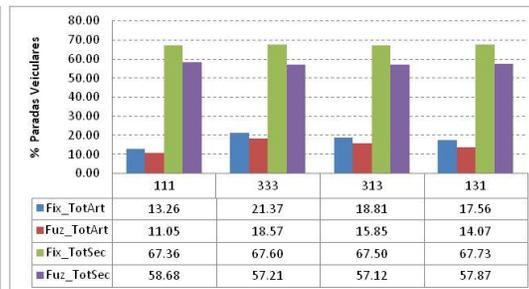


(c) Volume Baixo

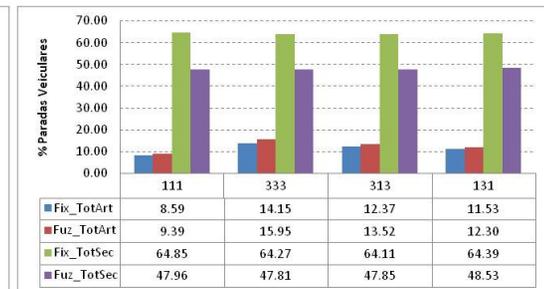
Figura C-1 Atraso Médio por tipo de via



(a) Volume Alto

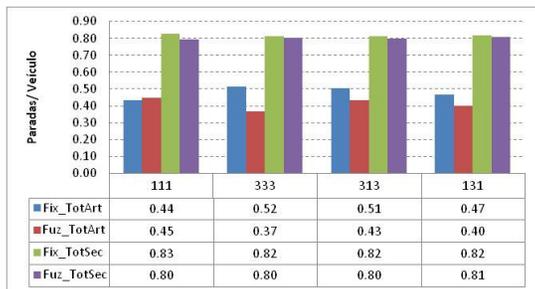


(b) Volume Médio

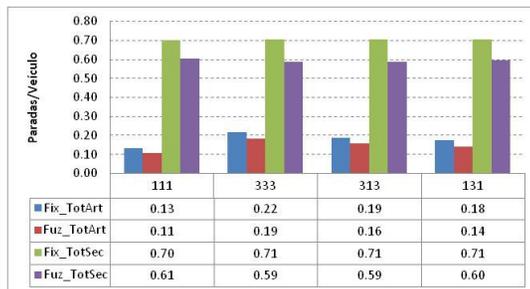


(c) Volume Baixo

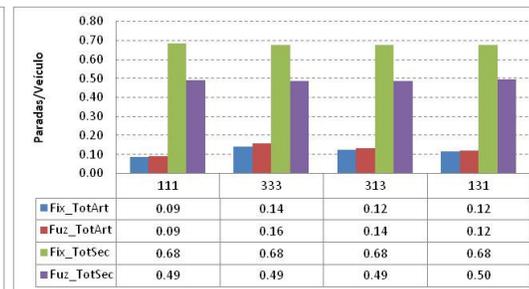
Figura C-2 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via



(a) Volume Alto

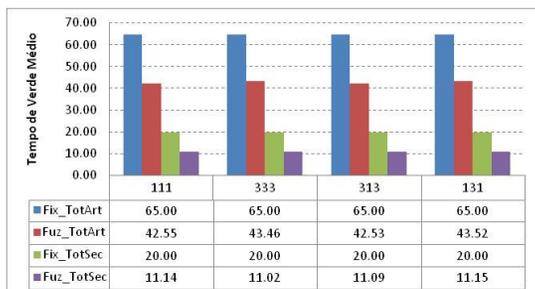


(b) Volume Médio

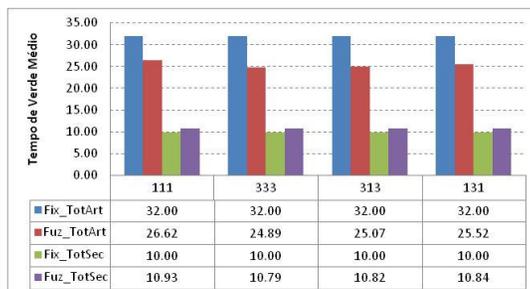


(c) Volume Baixo

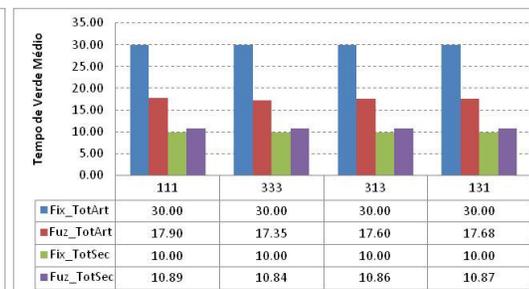
Figura C-3 Paradas por Veículo por tipo de via



(a) Volume Alto



(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura C-4 Tempo de Verde médio por tipo de via

Tabela C-1 Diferença percentual entre o Atraso Médio observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial

Rede	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy
111	-25.8%	-46.0%	161.0%	88.7%	326.5%	96.8%
333	-30.4%	-18.8%	65.5%	24.6%	152.9%	29.2%
313	-32.8%	-42.5%	91.1%	39.1%	195.7%	47.0%
131	-29.2%	-31.8%	103.2%	51.6%	215.5%	58.6%

Tabela C-2 Diferença percentual entre o Percentual de Paradas Veiculares observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial

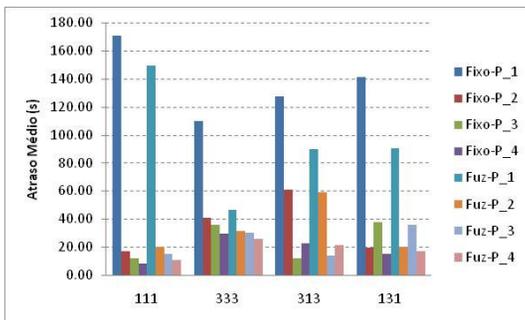
Rede	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy
111	142.0%	99.2%	408.1%	431.0%	654.6%	410.7%
333	64.6%	117.2%	216.3%	208.1%	354.3%	199.7%
313	75.9%	91.4%	258.8%	260.4%	418.5%	253.9%
131	96.1%	106.8%	285.7%	311.3%	458.6%	294.4%

Tabela C-3 Diferença percentual entre Paradas por Veículos observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial

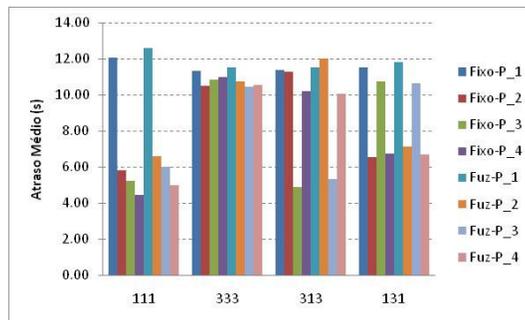
Rede	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy
111	89.3%	76.3%	424.8%	446.3%	686.6%	421.8%
333	58.2%	119.2%	226.3%	216.4%	374.9%	205.6%
313	61.0%	84.1%	272.0%	269.9%	442.8%	261.3%
131	74.7%	101.7%	298.4%	322.8%	483.6%	301.2%

Tabela C-4 Diferença percentual entre Tempo Médio de Verde observado para o conjunto de vias secundárias em relação ao observado para a via arterial

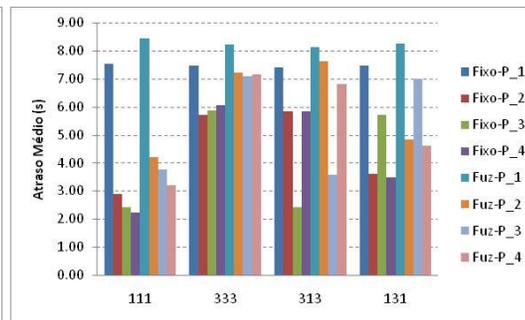
Rede	Volume Alto		Volume Médio		Volume Baixo	
	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy	Fixo Coordenado	Fuzzy
111	-69.2%	-73.8%	-68.8%	-58.9%	-66.7%	-39.1%
333	-69.2%	-74.7%	-68.8%	-56.7%	-66.7%	-37.5%
313	-69.2%	-73.9%	-68.8%	-56.8%	-66.7%	-38.3%
131	-69.2%	-74.4%	-68.8%	-57.5%	-66.7%	-38.5%



(a) Volume Alto

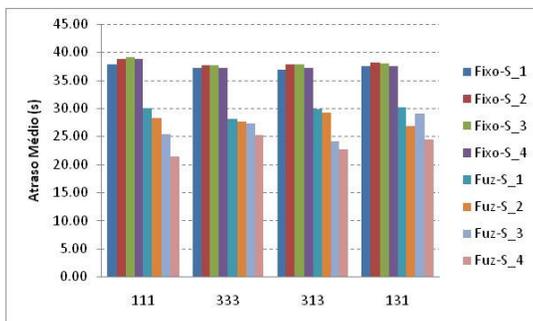


(b) Volume Médio

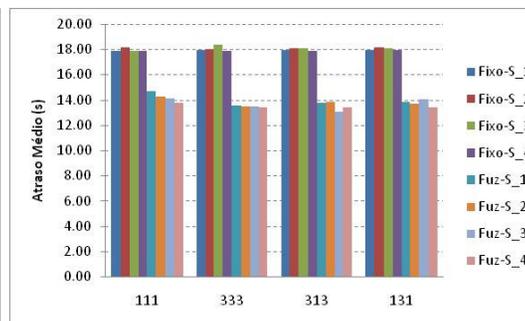


(c) Volume Baixo

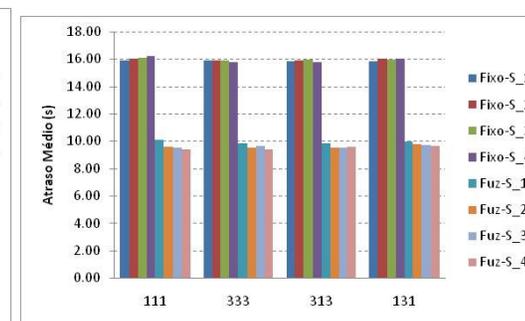
Figura C-5 Atraso Médio por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

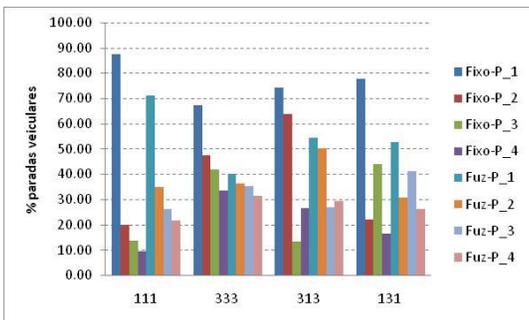


(b) Volume Médio

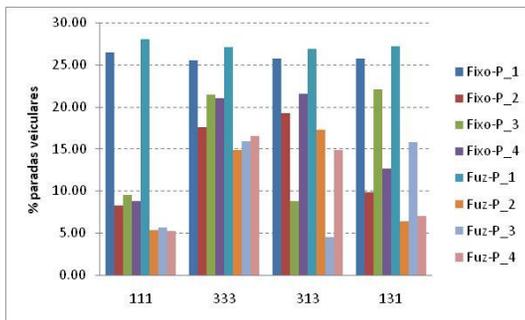


(c) Volume Baixo

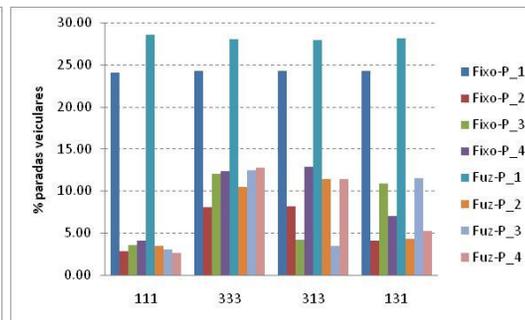
Figura C-6 Atraso Médio por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

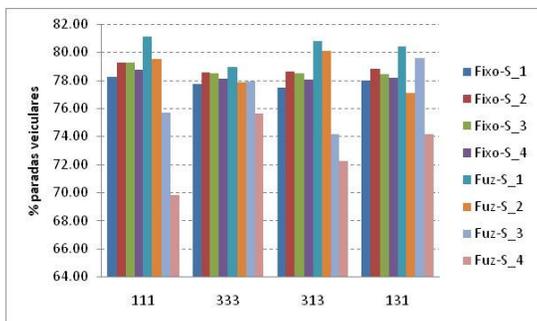


(b) Volume Médio

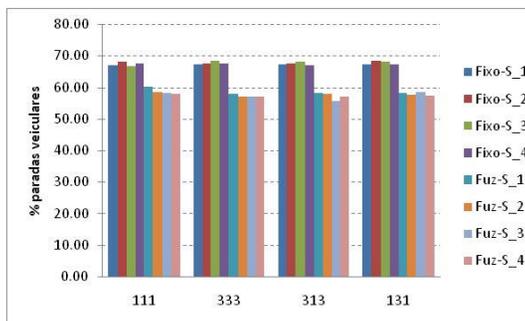


(c) Volume Baixo

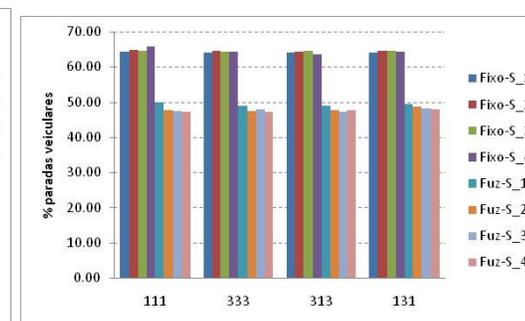
Figura C-7 Percentual de paradas veiculares por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

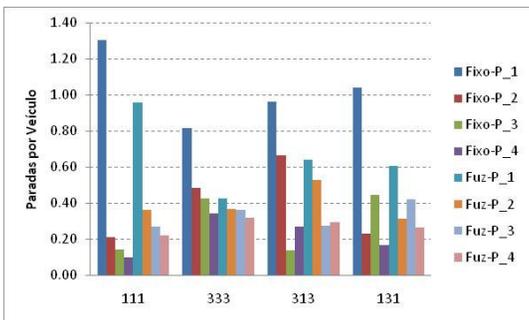


(b) Volume Médio

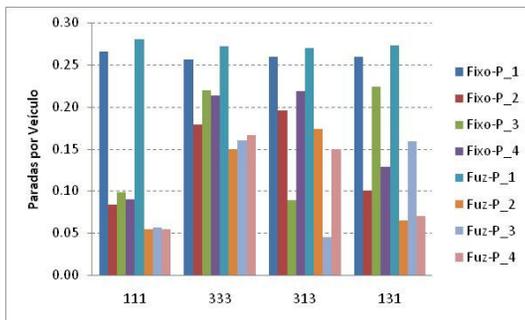


(c) Volume Baixo

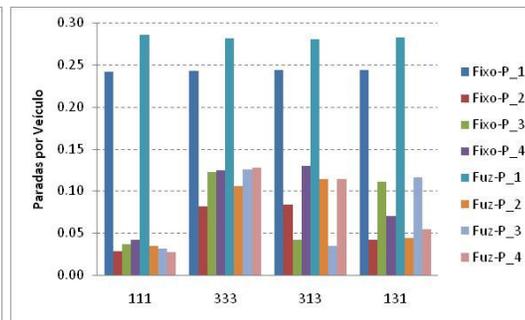
Figura C-8 Percentual de paradas veiculares por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

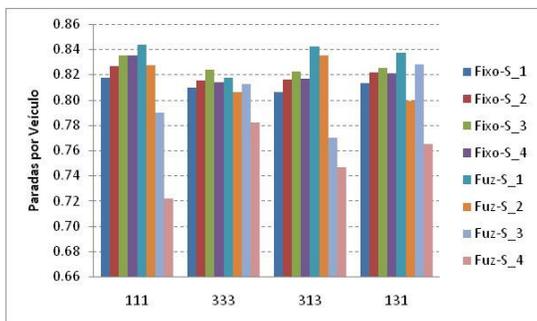


(b) Volume Médio

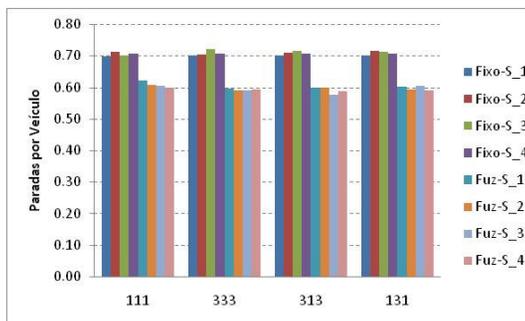


(c) Volume Baixo

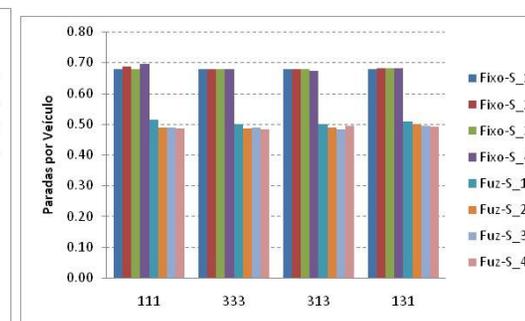
Figura C-9 Paradas por veículo por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

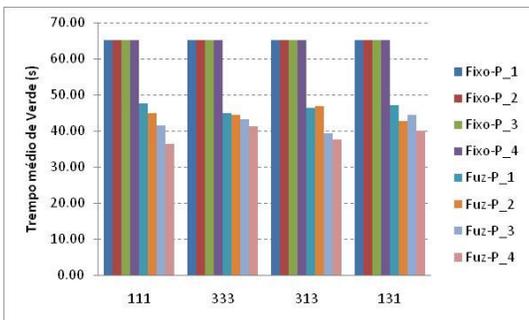


(b) Volume Médio

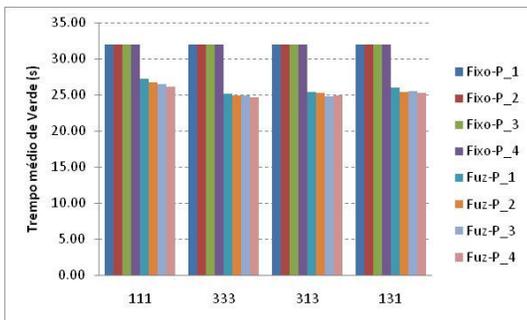


(c) Volume Baixo

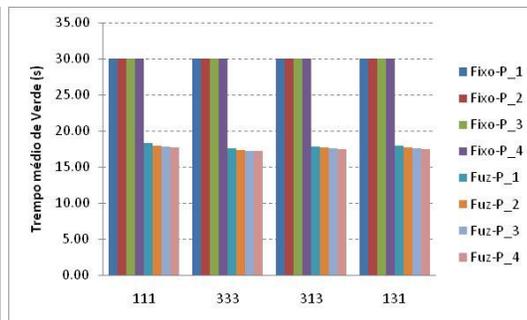
Figura C-10 Paradas por veículo por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto

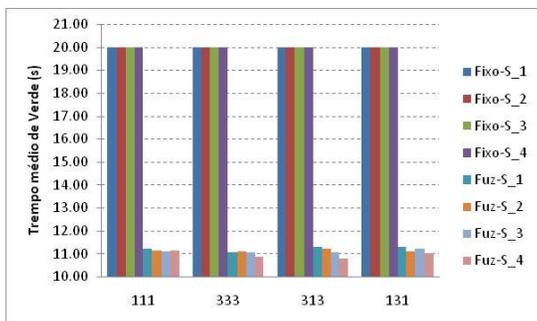


(b) Volume Médio

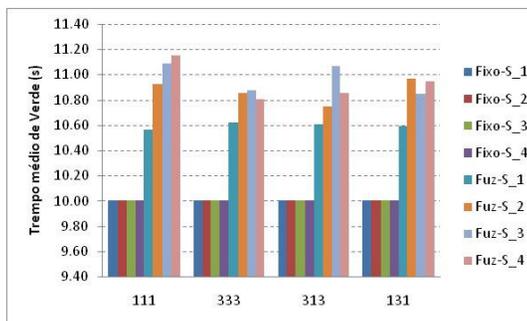


(c) Volume Baixo

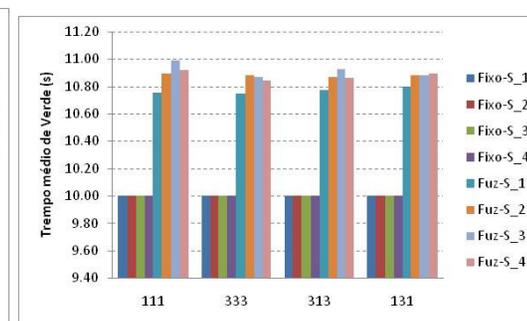
Figura C-11 Tempo Médio de Verde por aproximação para via arterial, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*



(a) Volume Alto



(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura C-12 Tempo Médio de Verde por aproximação para vias secundárias, para os controles fixo-coordenado e *fuzzy*

Tabela C-5 Atraso Médio, para cada aproximação da rede, por tipo de controle

Via tipo	Volume	Rede	FixCoor				Fuz2			
			Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.1	Int.2	Int.3	Int.4
Arterial	Alto	111	170.90	17.22	12.21	8.37	149.06	19.79	15.12	10.88
		333	109.59	40.84	35.55	29.24	46.17	31.37	30.05	25.65
		313	127.35	61.14	11.92	22.79	89.88	58.78	13.82	21.42
		131	141.28	19.68	37.33	15.30	90.24	19.83	35.44	16.75
	Médio	111	12.07	5.78	5.22	4.44	12.59	6.58	6.00	4.96
		333	11.33	10.51	10.81	10.96	11.54	10.72	10.45	10.55
		313	11.35	11.27	4.86	10.21	11.50	11.99	5.30	10.05
		131	11.50	6.52	10.74	6.73	11.82	7.10	10.63	6.70
	Baixo	111	7.52	2.89	2.42	2.21	8.43	4.21	3.78	3.21
		333	7.47	5.71	5.88	6.05	8.21	7.22	7.08	7.16
		313	7.41	5.84	2.40	5.83	8.12	7.62	3.56	6.82
		131	7.45	3.60	5.71	3.49	8.24	4.82	6.99	4.60
Secundária	Alto	111	37.84	38.81	39.15	38.85	30.03	28.27	25.41	21.31
		333	37.19	37.72	37.68	37.12	28.13	27.56	27.21	25.28
		313	36.89	37.88	37.85	37.16	29.79	29.24	24.05	22.62
		131	37.53	38.13	37.99	37.48	30.11	26.82	29.08	24.46
	Médio	111	17.88	18.14	17.87	17.89	14.70	14.26	14.13	13.77
		333	17.92	17.99	18.34	17.88	13.56	13.47	13.48	13.39
		313	17.92	18.10	18.07	17.90	13.77	13.80	13.04	13.41
		131	17.92	18.12	18.09	17.93	13.84	13.67	14.01	13.40
	Baixo	111	15.88	15.99	16.07	16.20	10.11	9.59	9.52	9.40
		333	15.87	15.91	15.88	15.79	9.81	9.48	9.63	9.40
		313	15.86	15.88	15.98	15.79	9.80	9.49	9.49	9.60
		131	15.86	16.01	15.96	16.02	9.97	9.76	9.71	9.63

Tabela C-6 Percentual de Paradas Veiculares, para cada aproximação da rede, por tipo de controle

Via tipo	Volume	Rede	FixCoor				Fuz2			
			Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.1	Int.2	Int.3	Int.4
Arterial	Alto	111	87.48	19.70	13.76	9.50	71.03	34.97	26.28	21.47
		333	67.41	47.47	41.65	33.62	40.00	36.30	35.15	31.47
		313	74.26	63.89	13.28	26.40	54.21	50.28	26.90	29.17
		131	77.70	22.10	43.74	16.34	52.73	30.74	41.11	26.00
	Médio	111	26.46	8.22	9.52	8.83	27.97	5.35	5.62	5.27
		333	25.49	17.57	21.47	20.97	27.06	14.80	15.91	16.50
		313	25.68	19.26	8.74	21.56	26.82	17.28	4.51	14.79
		131	25.76	9.78	22.06	12.64	27.19	6.34	15.79	6.95
	Baixo	111	23.99	2.80	3.55	4.03	28.49	3.41	3.03	2.63
		333	24.24	8.01	12.03	12.31	28.05	10.50	12.48	12.78
		313	24.29	8.20	4.15	12.83	27.87	11.43	3.42	11.37
		131	24.20	4.08	10.85	6.98	28.15	4.30	11.49	5.28
Secundária	Alto	111	78.23	79.29	79.24	78.74	81.12	79.53	75.65	69.80
		333	77.70	78.54	78.47	78.13	78.92	77.84	77.89	75.64
		313	77.45	78.65	78.48	78.06	80.77	80.09	74.13	72.27
		131	77.98	78.78	78.45	78.15	80.43	77.11	79.58	74.13
	Médio	111	67.07	68.07	66.80	67.45	60.11	58.56	58.22	57.83
		333	67.15	67.40	68.37	67.45	57.80	56.98	57.07	57.02
		313	67.20	67.57	68.21	66.99	58.20	57.74	55.64	56.93
		131	67.19	68.29	68.05	67.34	58.29	57.54	58.46	57.20
	Baixo	111	64.19	64.87	64.54	65.78	49.82	47.55	47.38	47.13
		333	64.15	64.49	64.20	64.20	48.82	47.52	47.82	47.04
		313	64.10	64.41	64.42	63.44	48.85	47.56	47.19	47.78
		131	64.07	64.53	64.52	64.38	49.35	48.66	48.26	47.83

Tabela C-7 Paradas por Veículo, para cada aproximação da rede, por tipo de controle

Via tipo	Volume	Rede	FixCoor				Fuz2			
			Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.1	Int.2	Int.3	Int.4
Arterial	Alto	111	1.30	0.21	0.14	0.10	0.95	0.36	0.27	0.22
		333	0.81	0.48	0.42	0.34	0.42	0.37	0.36	0.32
		313	0.96	0.66	0.14	0.27	0.64	0.53	0.27	0.30
		131	1.04	0.23	0.44	0.17	0.60	0.31	0.42	0.26
	Médio	111	0.27	0.08	0.10	0.09	0.28	0.05	0.06	0.05
		333	0.26	0.18	0.22	0.21	0.27	0.15	0.16	0.17
		313	0.26	0.20	0.09	0.22	0.27	0.17	0.05	0.15
		131	0.26	0.10	0.22	0.13	0.27	0.06	0.16	0.07
	Baixo	111	0.24	0.03	0.04	0.04	0.29	0.03	0.03	0.03
		333	0.24	0.08	0.12	0.12	0.28	0.11	0.13	0.13
		313	0.24	0.08	0.04	0.13	0.28	0.11	0.03	0.11
		131	0.24	0.04	0.11	0.07	0.28	0.04	0.12	0.05
Secundária	Alto	111	0.82	0.83	0.84	0.84	0.84	0.83	0.79	0.72
		333	0.81	0.82	0.82	0.81	0.82	0.81	0.81	0.78
		313	0.81	0.82	0.82	0.82	0.84	0.84	0.77	0.75
		131	0.81	0.82	0.83	0.82	0.84	0.80	0.83	0.76
	Médio	111	0.70	0.71	0.70	0.71	0.62	0.61	0.60	0.60
		333	0.70	0.70	0.72	0.71	0.60	0.59	0.59	0.59
		313	0.70	0.71	0.72	0.71	0.60	0.60	0.58	0.59
		131	0.70	0.72	0.71	0.71	0.60	0.59	0.61	0.59
	Baixo	111	0.68	0.69	0.68	0.70	0.51	0.49	0.49	0.48
		333	0.68	0.68	0.68	0.68	0.50	0.49	0.49	0.48
		313	0.68	0.68	0.68	0.67	0.50	0.49	0.48	0.49
		131	0.68	0.68	0.68	0.68	0.51	0.50	0.50	0.49

Tabela C-8 Tempo Médio de Verde para cada interseção da rede, por tipo de controle

Via tipo	Volume	Rede	FixCoor				Fuz2			
			Int.1	Int.2	Int.3	Int.4	Int.1	Int.2	Int.3	Int.4
Arterial	Alto	111	65.00	65.00	65.00	65.00	47.50	44.86	41.48	36.34
		333	65.00	65.00	65.00	65.00	44.96	44.35	43.21	41.31
		313	65.00	65.00	65.00	65.00	46.26	46.92	39.36	37.58
		131	65.00	65.00	65.00	65.00	46.99	42.67	44.41	40.03
	Médio	111	32.00	32.00	32.00	32.00	27.22	26.67	26.52	26.06
		333	32.00	32.00	32.00	32.00	25.14	24.93	24.84	24.68
		313	32.00	32.00	32.00	32.00	25.34	25.25	24.79	24.89
		131	32.00	32.00	32.00	32.00	25.95	25.43	25.49	25.21
	Baixo	111	30.00	30.00	30.00	30.00	18.24	17.94	17.77	17.66
		333	30.00	30.00	30.00	30.00	17.59	17.37	17.24	17.20
		313	30.00	30.00	30.00	30.00	17.78	17.63	17.51	17.48
		131	30.00	30.00	30.00	30.00	17.95	17.69	17.62	17.44
Secundária	Alto	111	20.00	20.00	20.00	20.00	11.21	11.13	11.09	11.13
		333	20.00	20.00	20.00	20.00	11.04	11.09	11.04	10.88
		313	20.00	20.00	20.00	20.00	11.27	11.20	11.06	10.79
		131	20.00	20.00	20.00	20.00	11.28	11.09	11.21	11.00
	Médio	111	10.00	10.00	10.00	10.00	10.56	10.92	11.09	11.15
		333	10.00	10.00	10.00	10.00	10.62	10.85	10.88	10.81
		313	10.00	10.00	10.00	10.00	10.60	10.75	11.07	10.85
		131	10.00	10.00	10.00	10.00	10.59	10.96	10.84	10.95
	Baixo	111	10.00	10.00	10.00	10.00	10.76	10.90	10.99	10.92
		333	10.00	10.00	10.00	10.00	10.75	10.88	10.87	10.84
		313	10.00	10.00	10.00	10.00	10.77	10.87	10.92	10.86
		131	10.00	10.00	10.00	10.00	10.80	10.88	10.88	10.90

Tabela C-9 Diferença Percentual e absoluta dos tempos de verde médios para as aproximações da via arterial obtidos sob controle *fuzzy* em relação ao tempo de verde médio para o controle por tempo fixo coordenado

Volume	Rede	P_1		P_2		P_3		P_4	
		Diferença percentual	Diferença Absoluta (s)						
Alto	111	-26.9%	-17.5	-31.0%	-20.1	-36.2%	-23.5	-44.1%	-28.7
	333	-30.8%	-20.0	-31.8%	-20.7	-33.5%	-21.8	-36.5%	-23.7
	313	-28.8%	-18.7	-27.8%	-18.1	-39.4%	-25.6	-42.2%	-27.4
	131	-27.7%	-18.0	-34.4%	-22.3	-31.7%	-20.6	-38.4%	-25.0
Médio	111	-14.9%	-4.8	-16.7%	-5.3	-17.1%	-5.5	-18.6%	-5.9
	333	-21.4%	-6.9	-22.1%	-7.1	-22.4%	-7.2	-22.9%	-7.3
	313	-20.8%	-6.7	-21.1%	-6.8	-22.5%	-7.2	-22.2%	-7.1
	131	-18.9%	-6.0	-20.5%	-6.6	-20.3%	-6.5	-21.2%	-6.8
Baixo	111	-39.2%	-11.8	-40.2%	-12.1	-40.8%	-12.2	-41.1%	-12.3
	333	-41.4%	-12.4	-42.1%	-12.6	-42.5%	-12.8	-42.7%	-12.8
	313	-40.7%	-12.2	-41.2%	-12.4	-41.6%	-12.5	-41.7%	-12.5
	131	-40.2%	-12.0	-41.0%	-12.3	-41.3%	-12.4	-41.9%	-12.6

P_1: aproximação principal da interseção 1.

P_2: aproximação principal da interseção 2.

P_3: aproximação principal da interseção 3.

P_4: aproximação principal da interseção 4.

Tabela C-10 Diferença Percentual e absoluta dos tempos de verde médios para as aproximações secundárias obtidos sob controle *fuzzy* em relação ao tempo de verde médio para o controle por tempo fixo coordenado

Volume	Rede	S_1		S_2		S_3		S_4	
		Diferença percentual	Diferença Absoluta (s)						
Alto	111	-43.9%	-8.79	-44.4%	-8.87	-44.5%	-8.91	-44.4%	-8.87
	333	-44.8%	-8.96	-44.6%	-8.91	-44.8%	-8.96	-45.6%	-9.12
	313	-43.6%	-8.73	-44.0%	-8.80	-44.7%	-8.94	-46.1%	-9.21
	131	-43.6%	-8.72	-44.5%	-8.91	-43.9%	-8.79	-45.0%	-9.00
Médio	111	5.6%	0.56	9.2%	0.92	10.9%	1.09	11.5%	1.15
	333	6.2%	0.62	8.5%	0.85	8.8%	0.88	8.1%	0.81
	313	6.0%	0.60	7.5%	0.75	10.7%	1.07	8.5%	0.85
	131	5.9%	0.59	9.6%	0.96	8.4%	0.84	9.5%	0.95
Baixo	111	7.6%	0.76	9.0%	0.90	9.9%	0.99	9.2%	0.92
	333	7.5%	0.75	8.8%	0.88	8.7%	0.87	8.4%	0.84
	313	7.7%	0.77	8.7%	0.87	9.2%	0.92	8.6%	0.86
	131	8.0%	0.80	8.8%	0.88	8.8%	0.88	9.0%	0.90

S_1: aproximação secundária da interseção 1.

S_2: aproximação secundária da interseção 2.

S_3: aproximação secundária da interseção 3.

S_4: aproximação secundária da interseção 4.

Tabela C-11 Valores de p para os testes ANOVA e WILCOXON, para verificação da significância estatística do modo de controle, para medidas por aproximação

Rede	Volume	App	AM	%Par	Par/Veh	Verde
111	Alto	P_1	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_2	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_3	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001*	<.0001*	0.0011*	<.0001*
		S_2	<.0001*	0.8303*	0.5221*	<.0001*
		S_3	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_4	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Médio	P_1	0.0064*	0.0002	0.0003*	<.0001*
		P_2	0.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_3	0.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	0.001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_2	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_3	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_4	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
Baixo	P_1	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*	
	P_2	<.0001	0.1071*	0.0809*	<.0001*	
	P_3	<.0001	0.0823*	0.0826*	<.0001*	
	P_4	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*	
	S_1	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
	S_2	<.0001	<.0001*	<.0001	<.0001*	
	S_3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
	S_4	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*	

* valores de p para o teste de Wilcoxon.
Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa

Rede	Volume	App	AM	%Par	Par/Veh	Verde
333	Alto	P_1	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_2	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_3	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_4	<.0001	0.0143	0.0438*	<.0001*
		S_1	<.0001*	0.0458	0.3175	<.0001*
		S_2	<.0001*	0.3183*	0.5817*	<.0001*
		S_3	<.0001*	0.3253	0.1706	<.0001*
		S_4	<.0001*	<.0001	0.0002	<.0001*
	Médio	P_1	0.2015	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_2	0.2311*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_3	0.8476*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	0.4825*	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_1	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_2	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_3	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_4	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
Baixo	P_1	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*	
	P_2	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*	
	P_3	<.0001	0.2903	0.5887*	<.0001*	
	P_4	<.0001	0.3632*	0.4123*	<.0001*	
	S_1	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
	S_2	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*	
	S_3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
	S_4	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	

* valores de p para o teste de Wilcoxon.
Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa

Continuação Tabela C-11

Rede	Volume	App	AM	%Par	Par/Veh	Verde
313	Alto	P_1	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_2	0.0712*	<.0001*	<.0001	<.0001*
		P_3	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	0.0345*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001*	<.0001*	0.0003*	<.0001*
		S_2	<.0001*	0.0667*	0.0610*	<.0001*
		S_3	<.0001*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_4	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Médio	P_1	0.1022*	0.0001	0.0008*	<.0001*
		P_2	0.0015*	0.0005*	0.0001*	<.0001*
		P_3	0.0022*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	0.7675*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_4	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*
	Baixo	P_1	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_2	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_3	<.0001	0.0061*	0.0061*	<.0001*
		P_4	<.0001*	0.0036	0.0034*	<.0001*
S_1		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
S_2		<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*	
S_3		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
S_4		<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*	

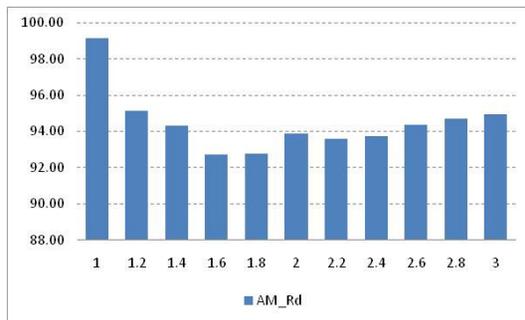
* valores de p para o teste de Wilcoxon.
 Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa

Rede	Volume	App	AM	%Par	Par/Veh	Verde
131	Alto	P_1	<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*
		P_2	0.7506*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_3	0.1815	0.0534	0.1173	<.0001*
		P_4	<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001*	0.0001	0.0075*	<.0001*
		S_2	<.0001*	0.0163	0.0173	<.0001*
		S_3	<.0001*	0.0630	0.7829*	<.0001*
		S_4	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
	Médio	P_1	0.0484	0.0002*	0.0006*	<.0001*
		P_2	0.0006*	<.0001	<.0001	<.0001*
		P_3	0.9882*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
		P_4	0.9587*	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_1	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*
		S_2	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_3	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
		S_4	<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*
	Baixo	P_1	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*
		P_2	<.0001*	0.5542*	0.4919*	<.0001*
		P_3	<.0001	0.2939*	0.4202*	<.0001*
		P_4	<.0001	<.0001	<.0001*	<.0001*
S_1		<.0001	<.0001*	<.0001	<.0001*	
S_2		<.0001	<.0001	<.0001	<.0001*	
S_3		<.0001	<.0001*	<.0001*	<.0001*	
S_4		<.0001*	<.0001	<.0001	<.0001*	

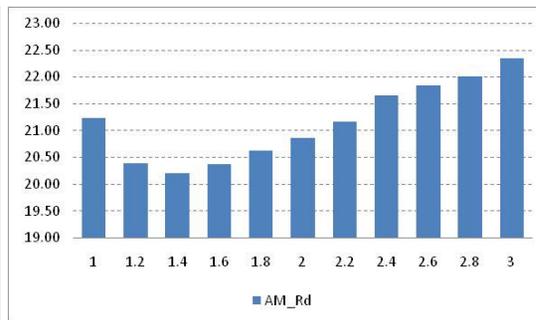
* valores de p para o teste de Wilcoxon.
 Para os valores de $p \leq 0,05$ a diferença é significativa

APÊNDICE D

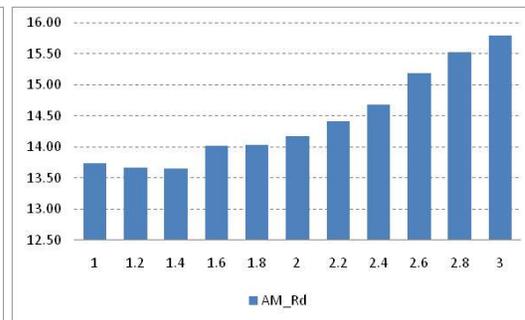
Tabelas e Gráficos relativos ao estudo do
aprimoramento da operação de rede arterial
utilizando Controladores Semafóricos
Fuzzy



(a) Volume Alto

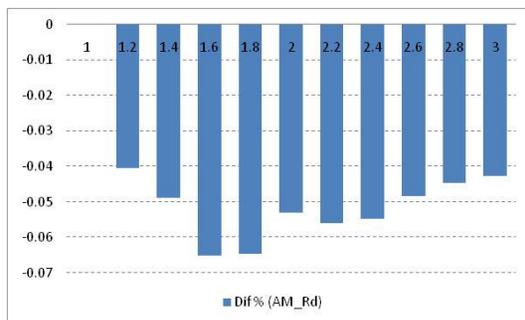


(b) Volume Médio

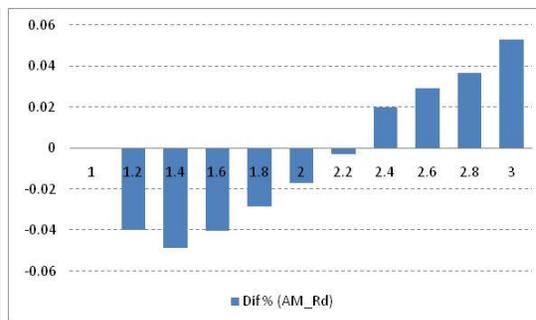


(c) Volume Baixo

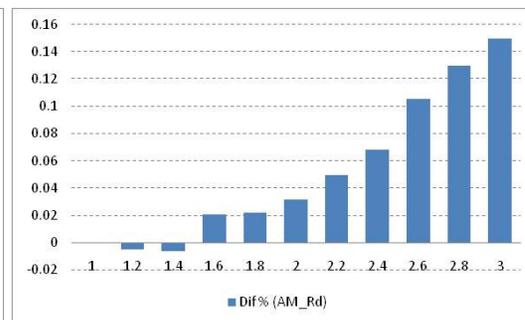
Figura D-1 Atraso Médio para a rede 111



(a) Volume Alto

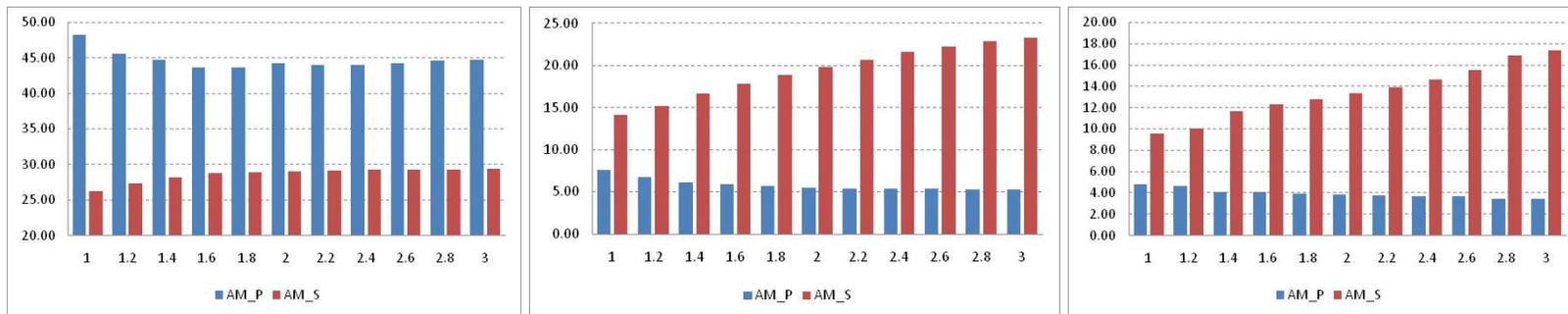


(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-2 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio, para a rede 111

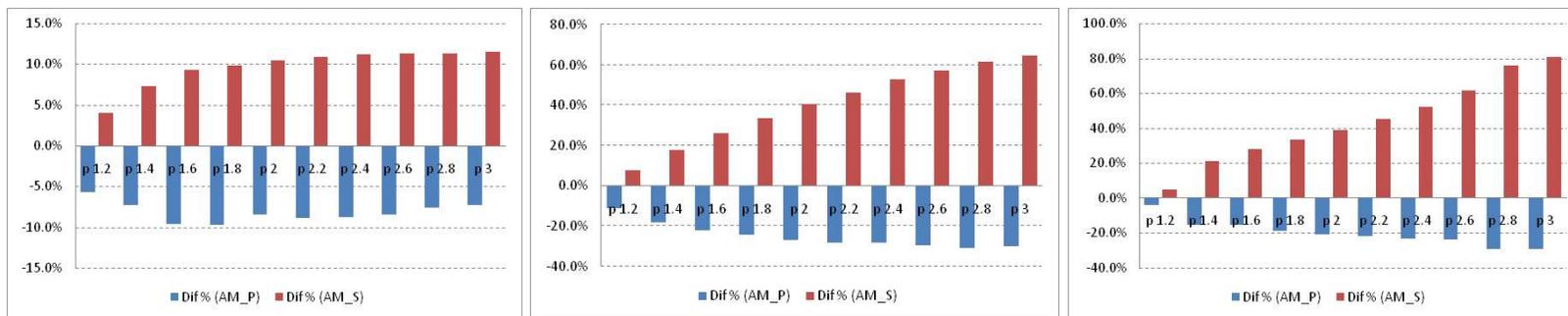


(a) Volume Alto

(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

Figura D-3 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 111

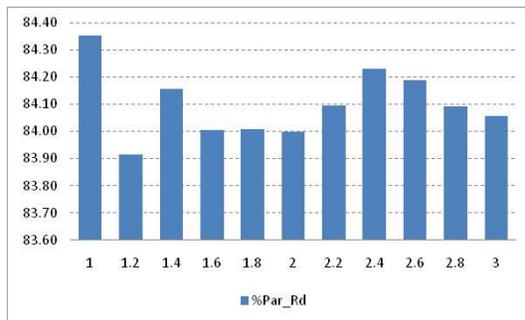


(a) Volume Alto

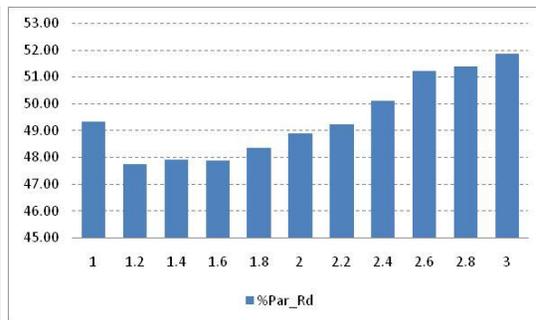
(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

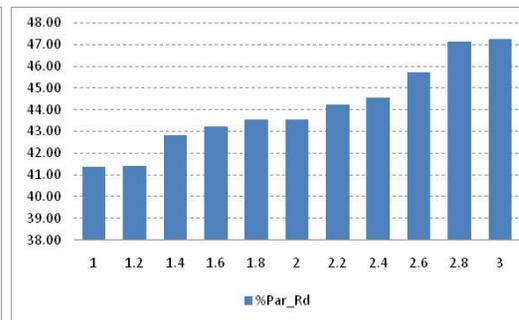
Figura D-4 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 111



(a) Volume Alto

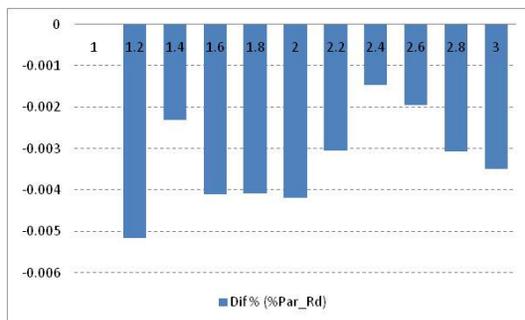


(b) Volume Médio

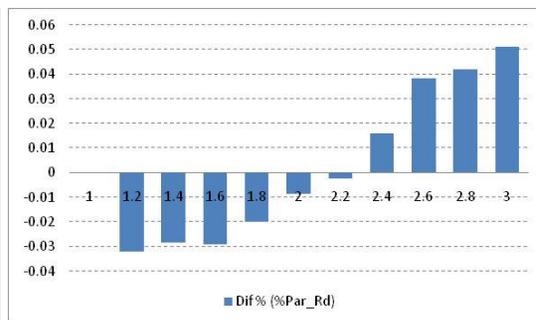


(c) Volume Baixo

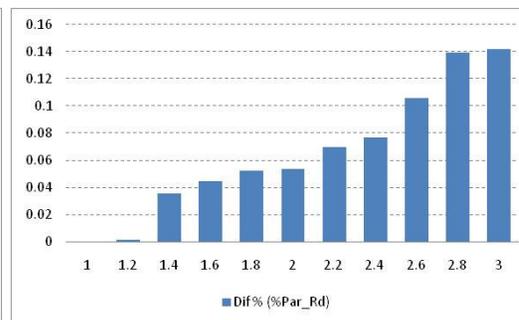
Figura D-5 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 111



(a) Volume Alto

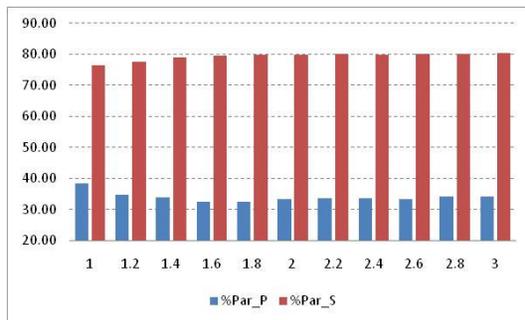


(b) Volume Médio

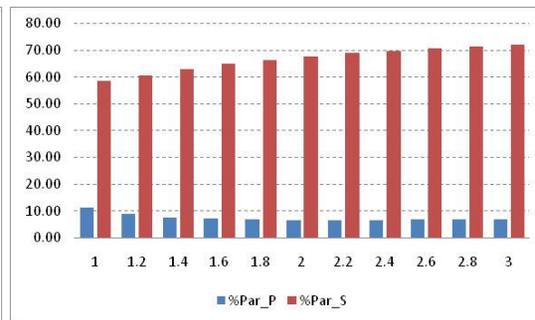


(c) Volume Baixo

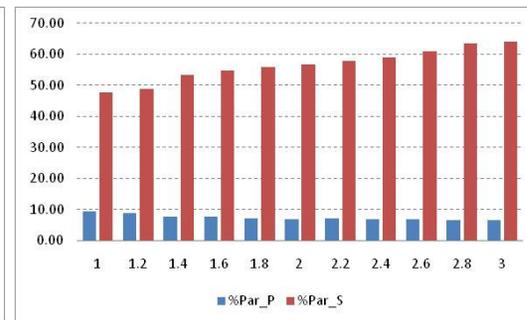
Figura D-6 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 111



(a) Volume Alto

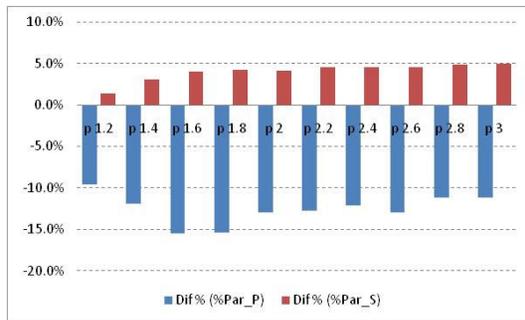


(b) Volume Médio

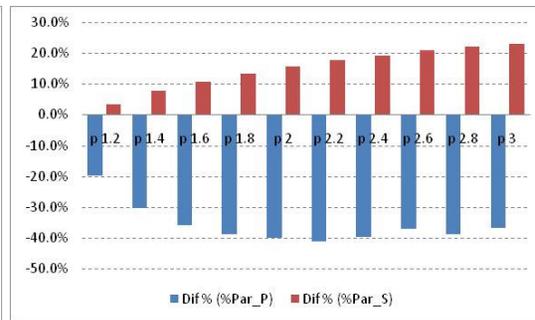


(c) Volume Baixo

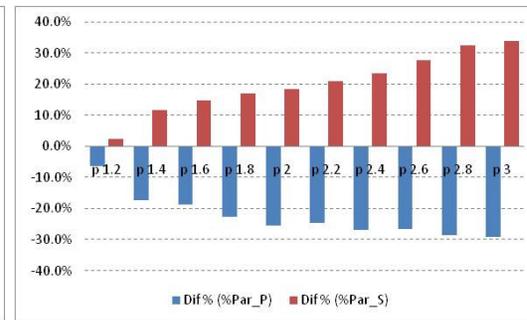
Figura D-7 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 111



(a) Volume Alto

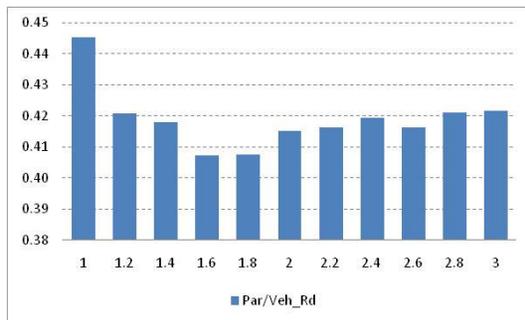


(b) Volume Médio

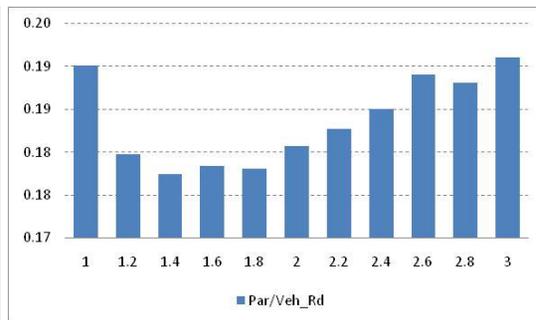


(c) Volume Baixo

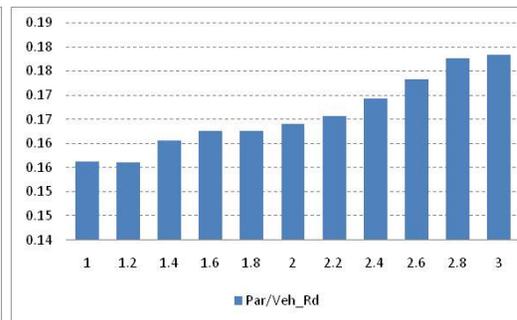
Figura D-8 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 111



(a) Volume Alto

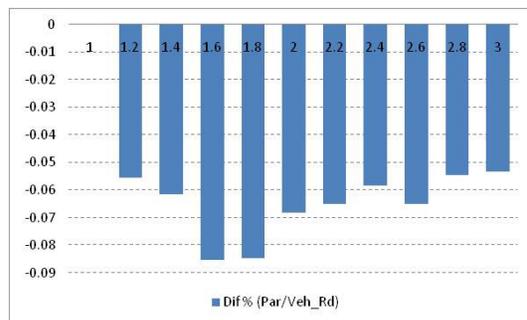


(b) Volume Médio

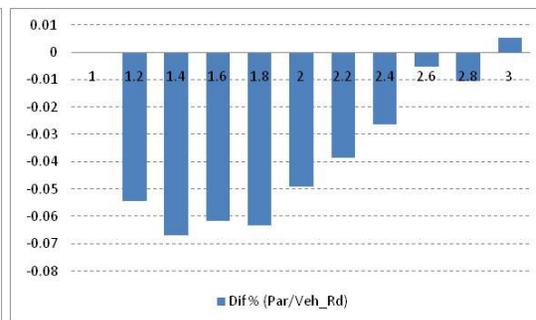


(c) Volume Baixo

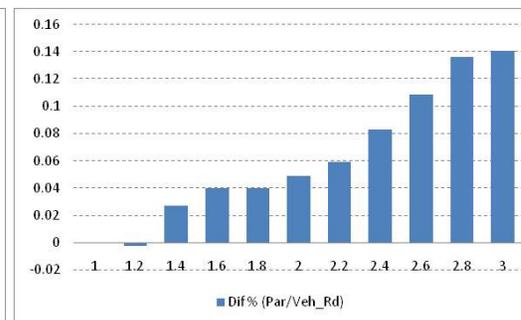
Figura D-9 Paradas por Veículo, para a rede 111



(a) Volume Alto

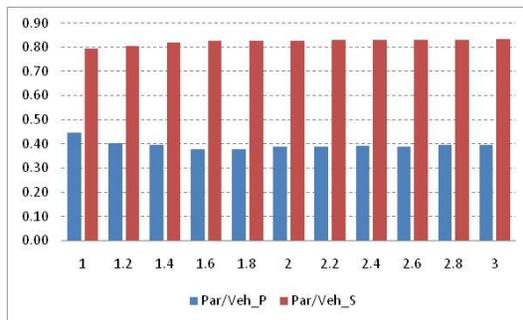


(b) Volume Médio

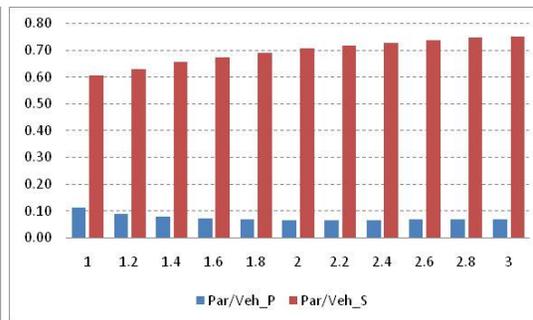


(c) Volume Baixo

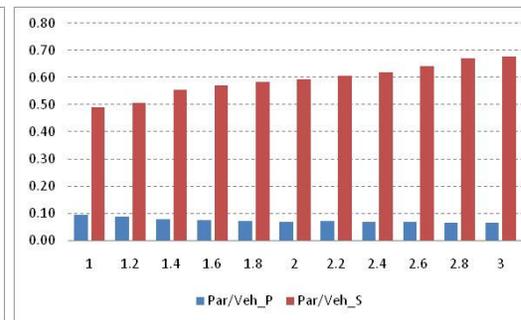
Figura D-10 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo, para a rede 111



(a) Volume Alto

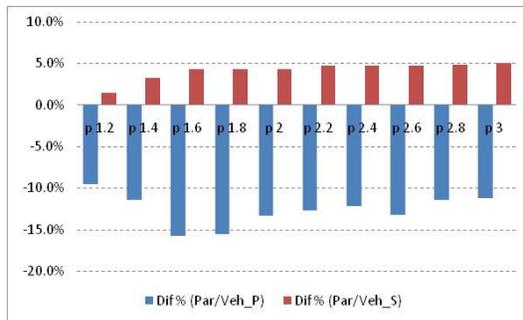


(b) Volume Médio

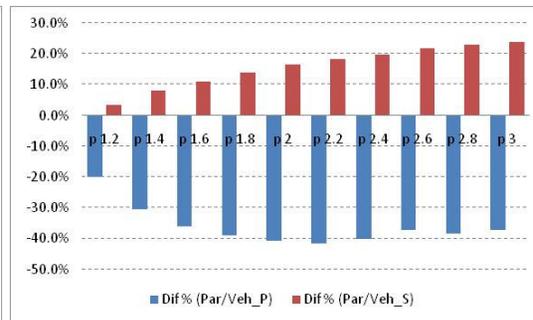


(c) Volume Baixo

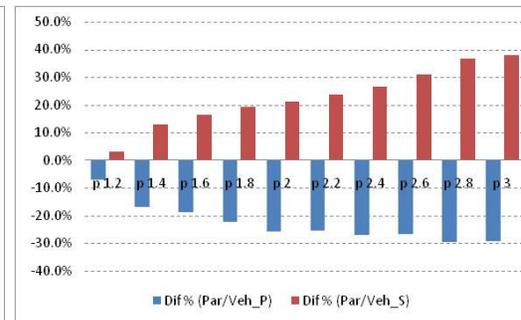
Figura D-11 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 111



(a) Volume Alto

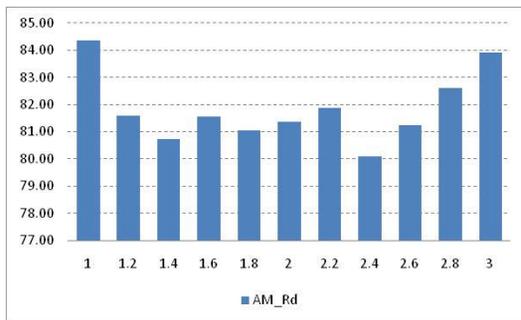


(b) Volume Médio

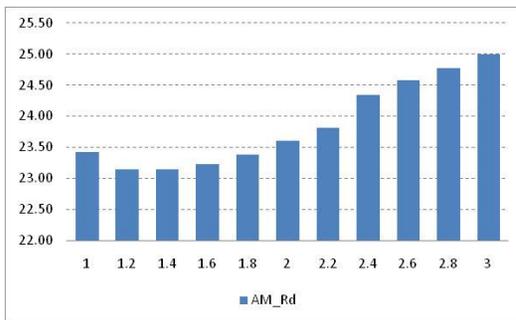


(c) Volume Baixo

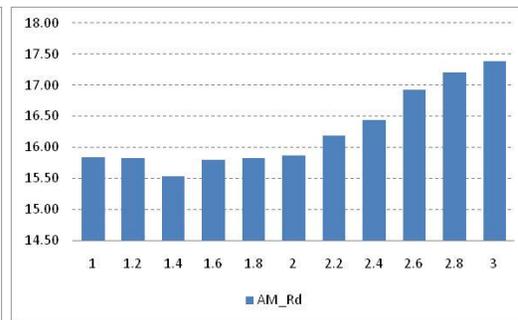
Figura D-12 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 111



(a) Volume Alto

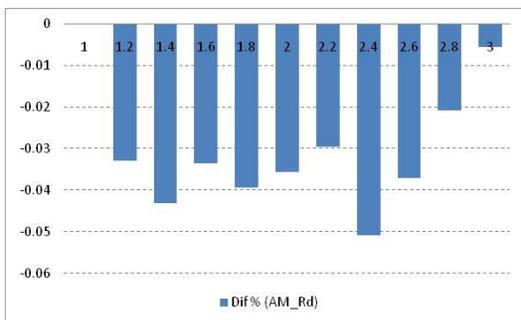


(b) Volume Médio

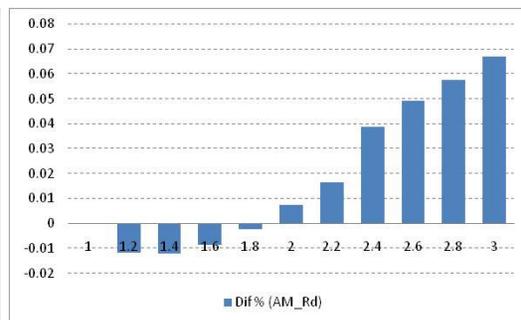


(c) Volume Baixo

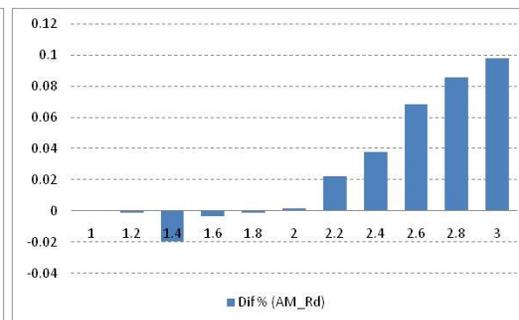
Figura D-13 Atraso Médio, para a rede 131



(a) Volume Alto

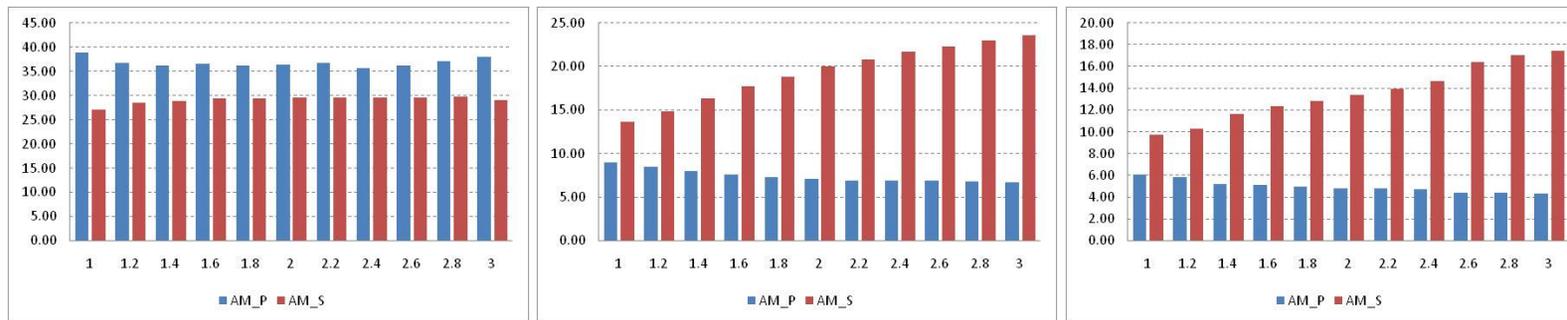


(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-14 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio, para a rede 131

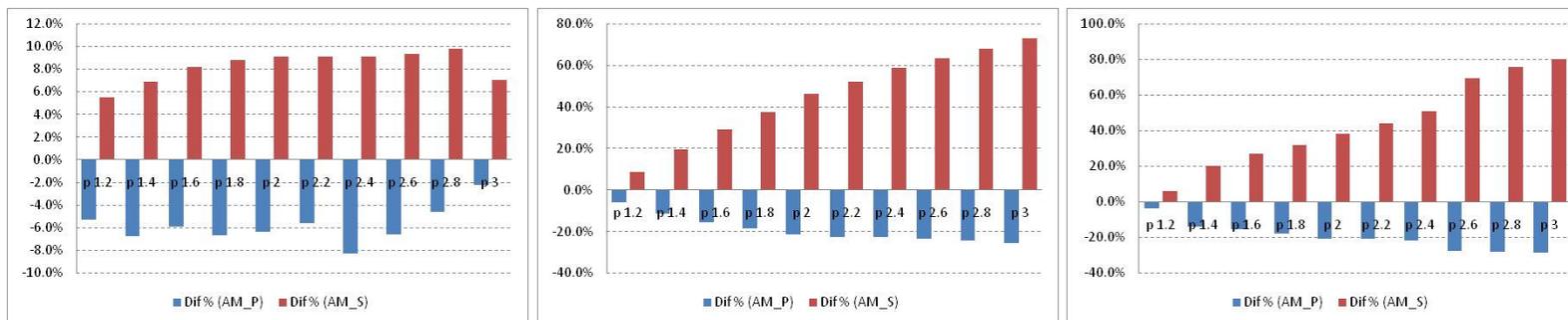


(a) Volume Alto

(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

Figura D-15 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131

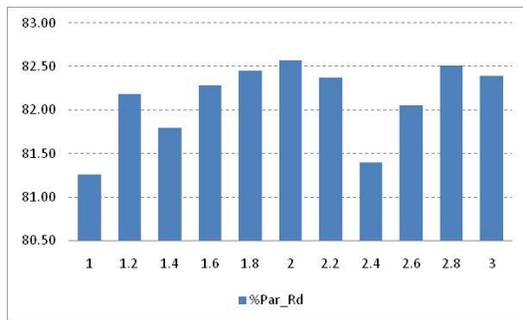


(a) Volume Alto

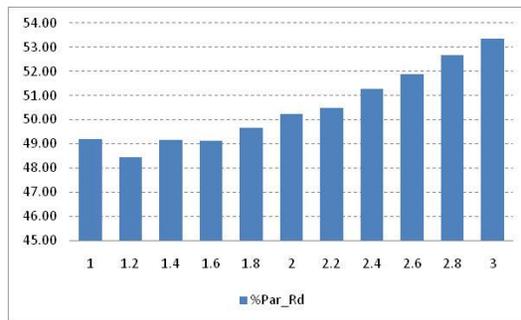
(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

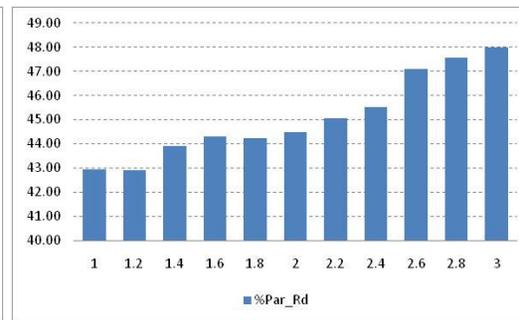
Figura D-16 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

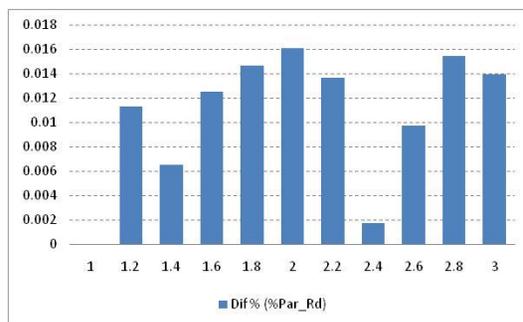


(b) Volume Médio

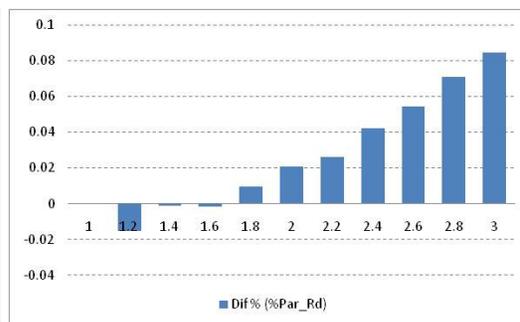


(c) Volume Baixo

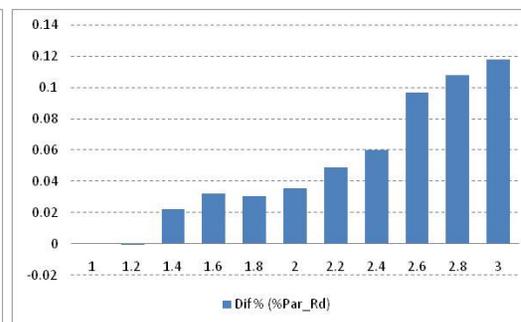
Figura D-17 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131



(a) Volume Alto

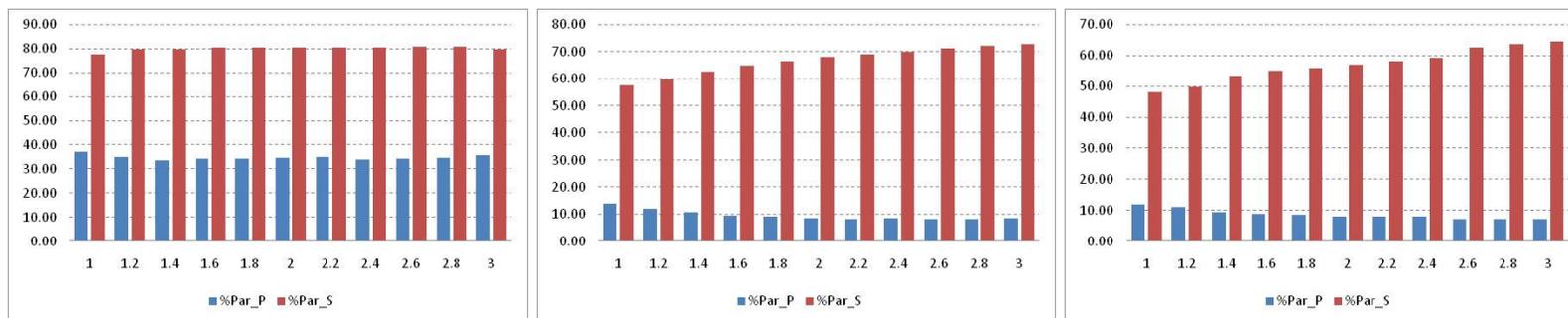


(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-18 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131

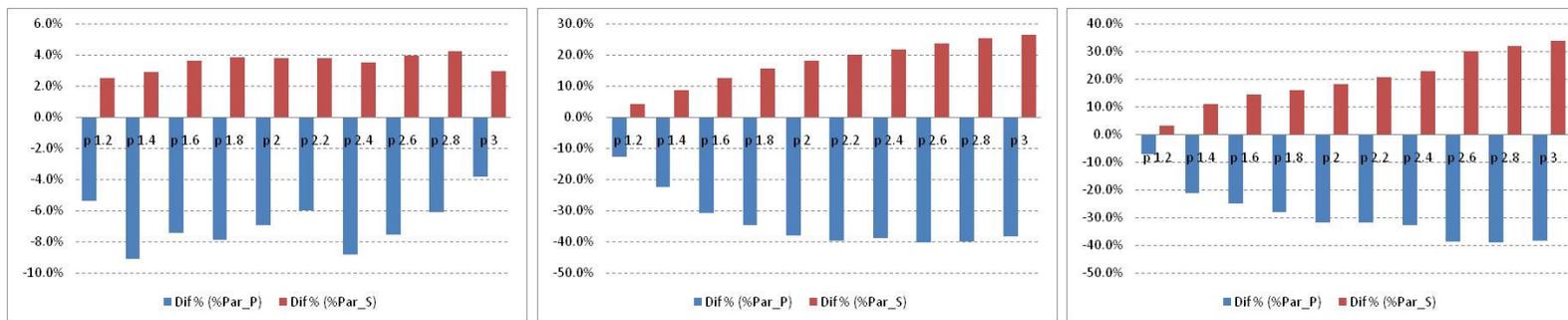


(a) Volume Alto

(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

Figura D-19 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131

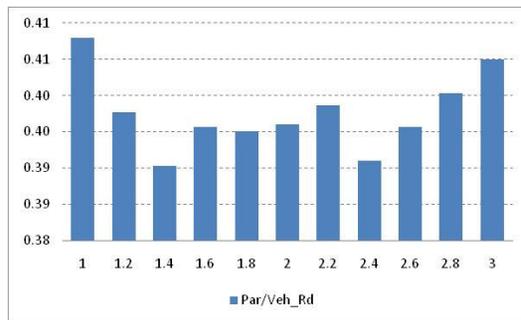


(a) Volume Alto

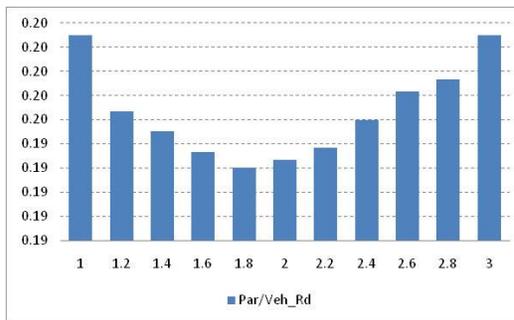
(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

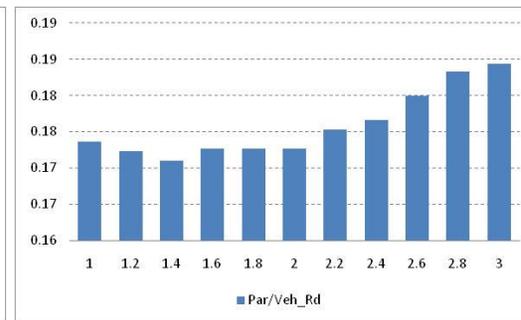
Figura D-20 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

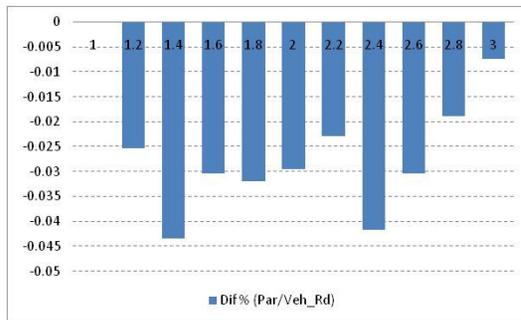


(b) Volume Médio

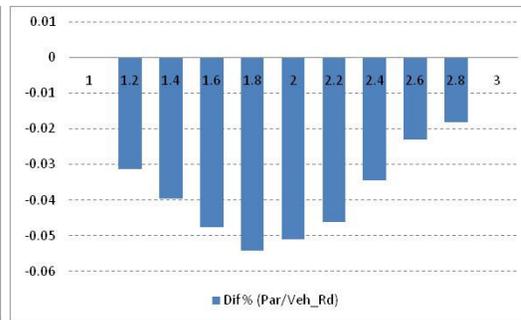


(c) Volume Baixo

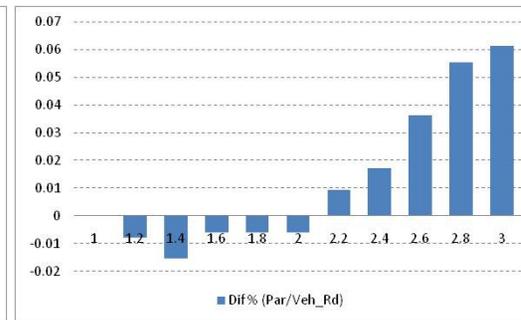
Figura D-21 Paradas por Veículo, para a rede 131



(a) Volume Alto

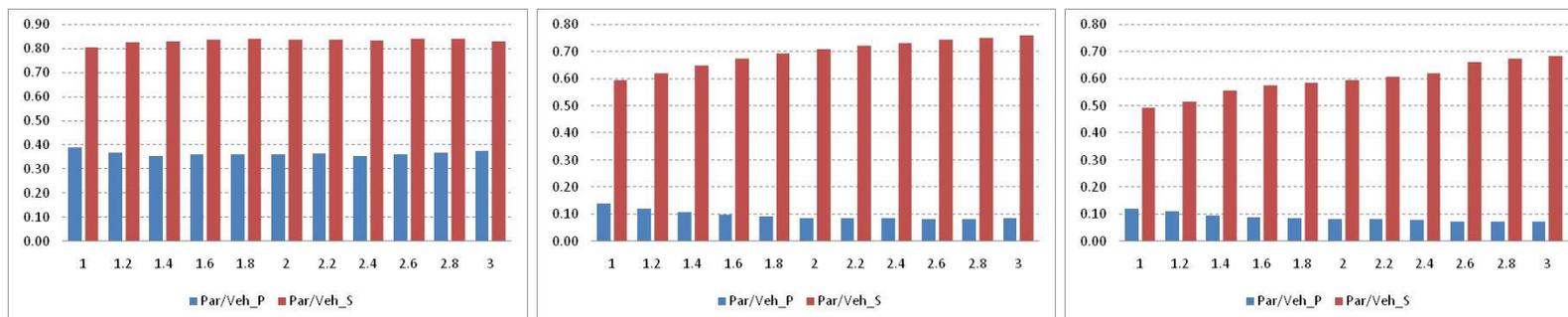


(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-22 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo, para a rede 131

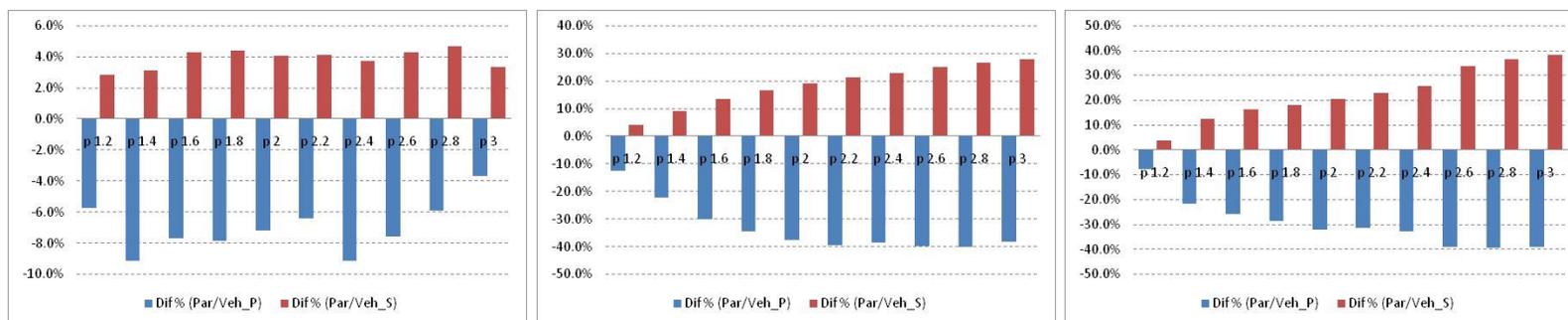


(a) Volume Alto

(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

Figura D-23 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131

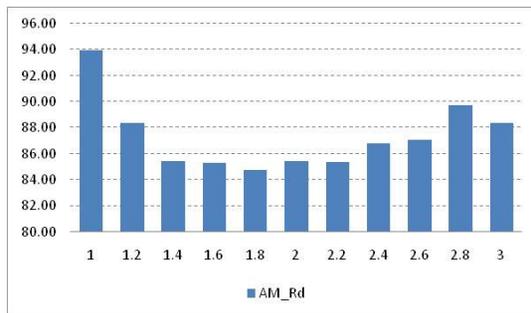


(a) Volume Alto

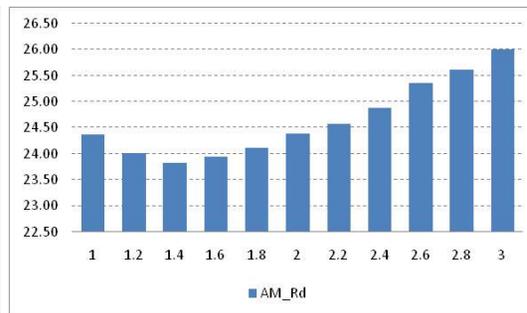
(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

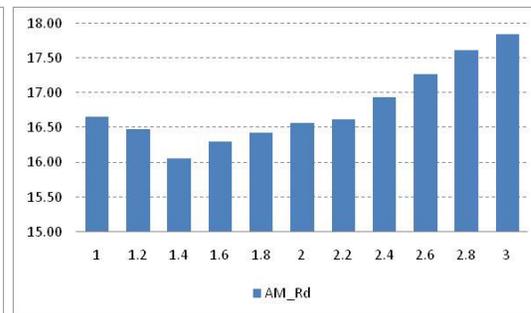
Figura D-24 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

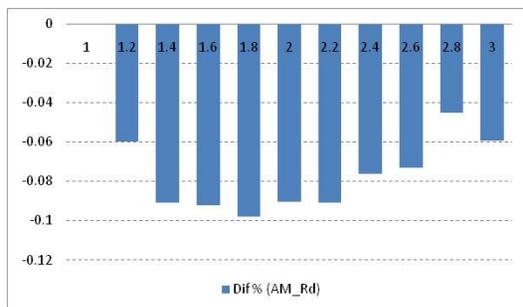


(b) Volume Médio

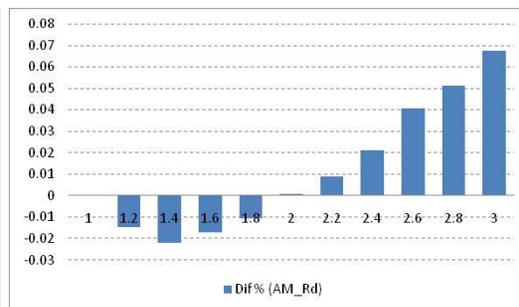


(c) Volume Baixo

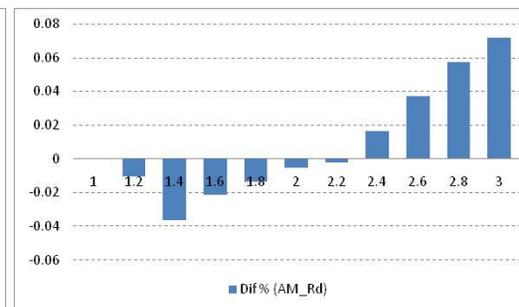
Figura D-25 Atraso Médio, para a rede 313



(a) Volume Alto

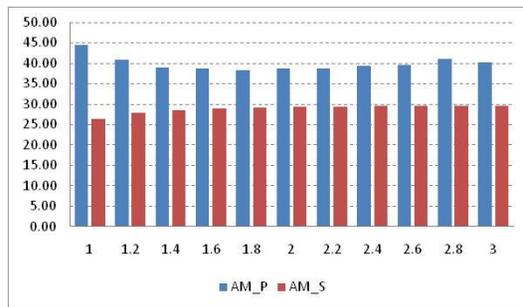


(b) Volume Médio

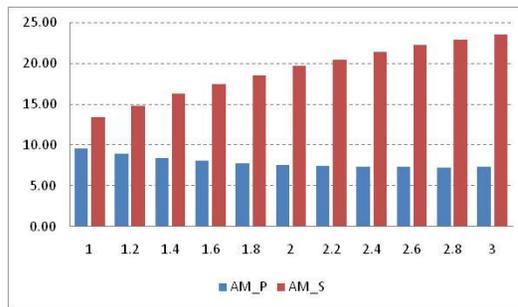


(c) Volume Baixo

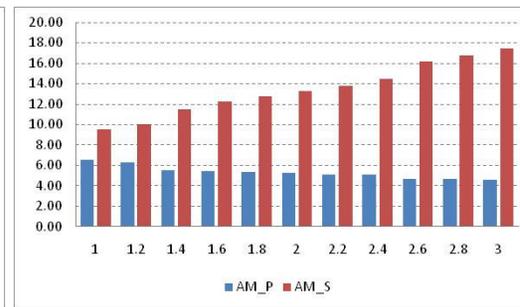
Figura D-26 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio, para a rede 313



(a) Volume Alto

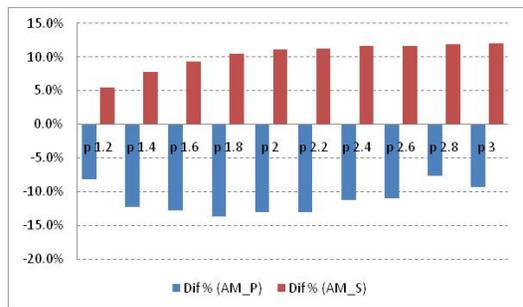


(b) Volume Médio

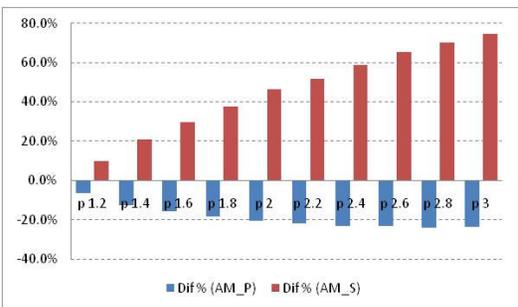


(c) Volume Baixo

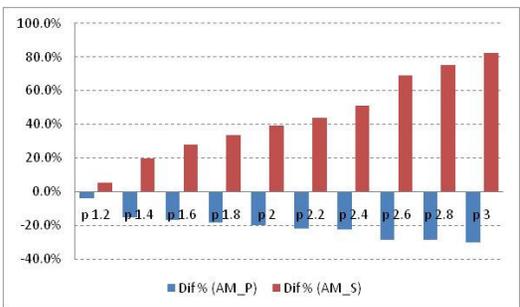
Figura D-27 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

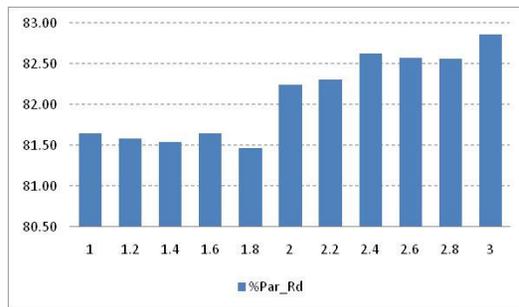


(b) Volume Médio

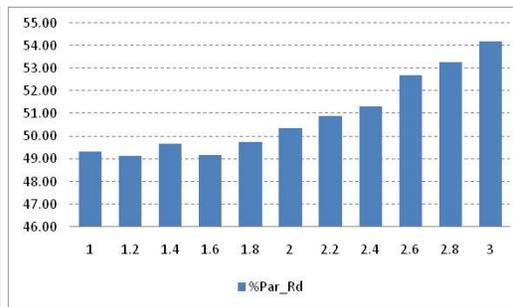


(c) Volume Baixo

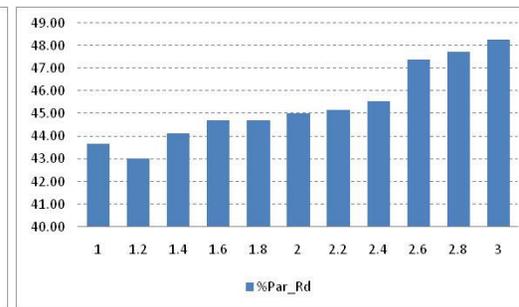
Figura D-28 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

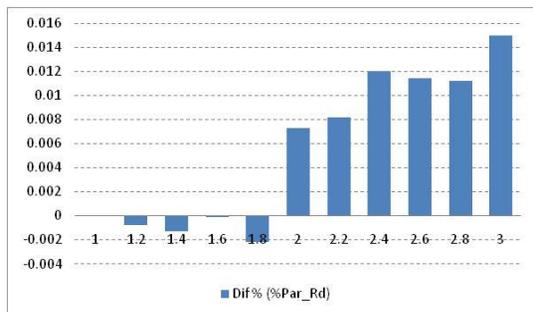


(b) Volume Médio

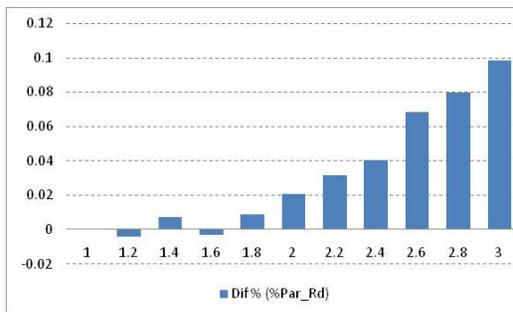


(c) Volume Baixo

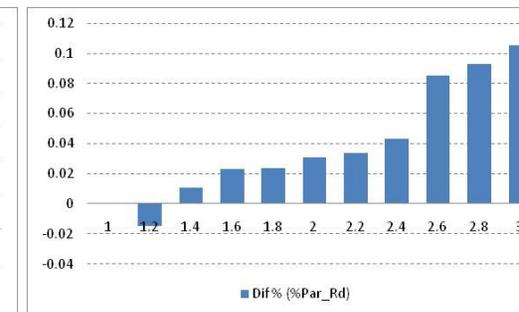
Figura D-29 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313



(a) Volume Alto

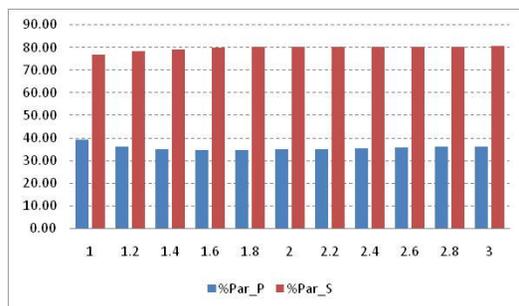


(b) Volume Médio

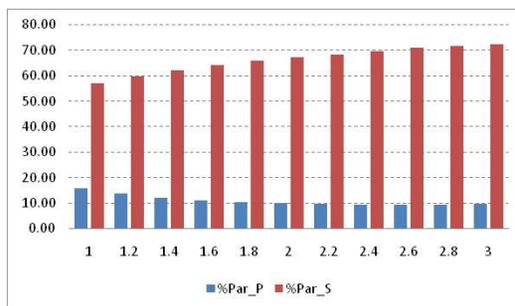


(c) Volume Baixo

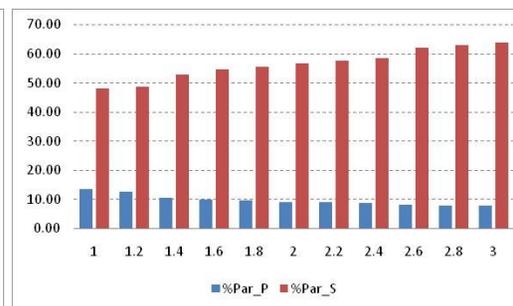
Figura D-30 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313



(a) Volume Alto

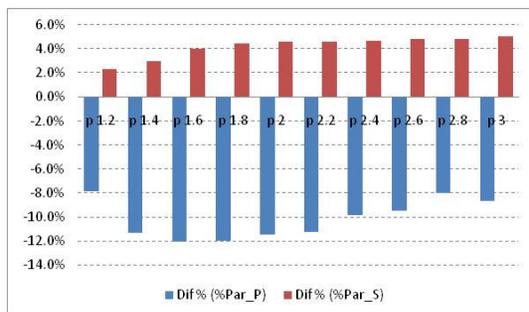


(b) Volume Médio

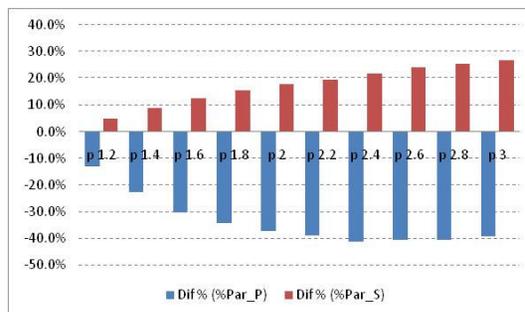


(c) Volume Baixo

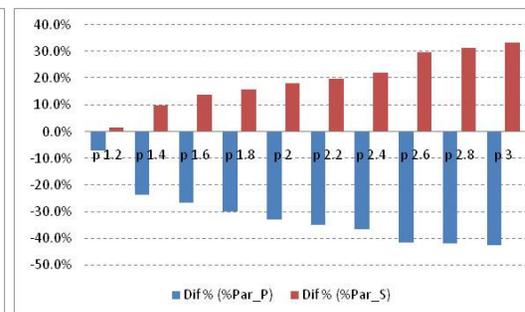
Figura D-31 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

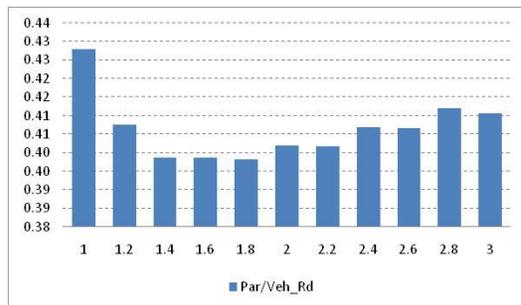


(b) Volume Médio

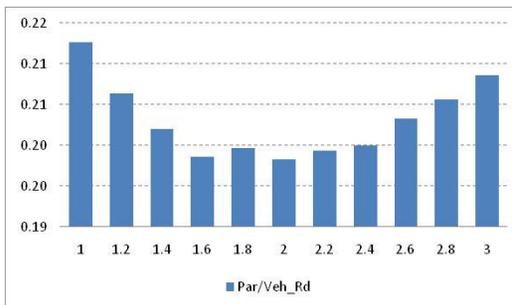


(c) Volume Baixo

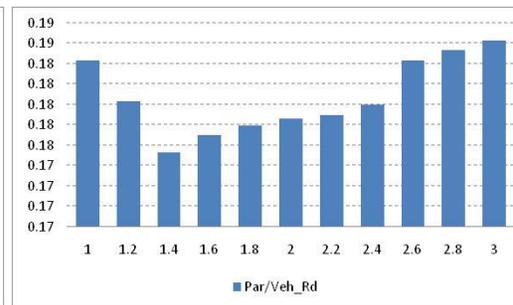
Figura D-32 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

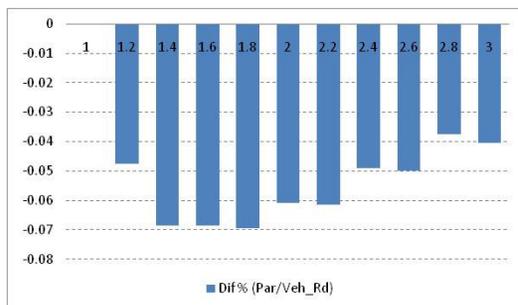


(b) Volume Médio

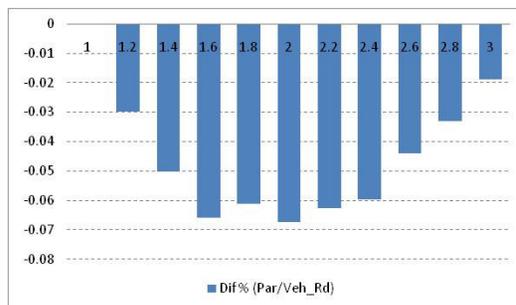


(c) Volume Baixo

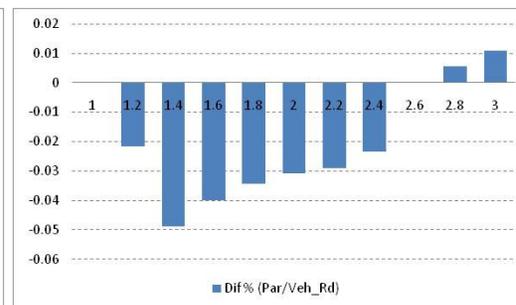
Figura D-33 Paradas por Veículo para a rede 313



(a) Volume Alto

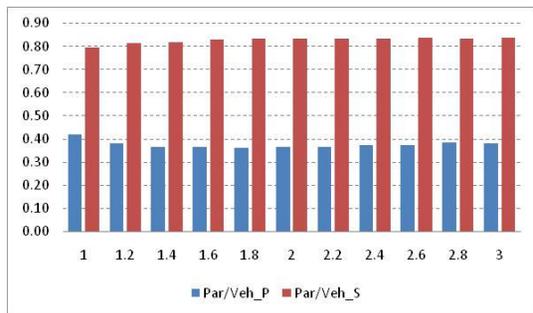


(b) Volume Médio

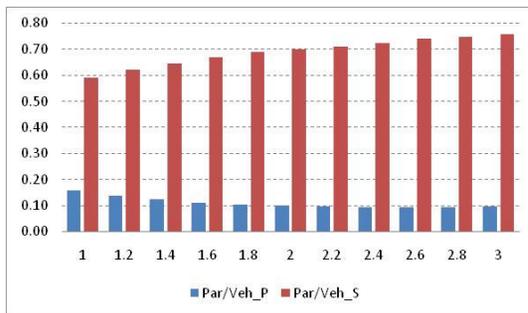


(c) Volume Baixo

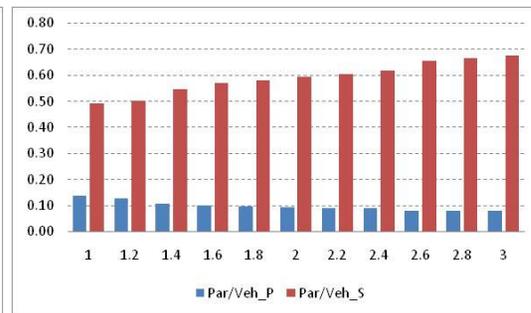
Figura D-34 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo para a rede 313



(a) Volume Alto

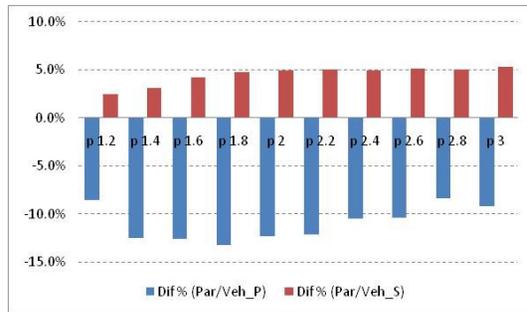


(b) Volume Médio

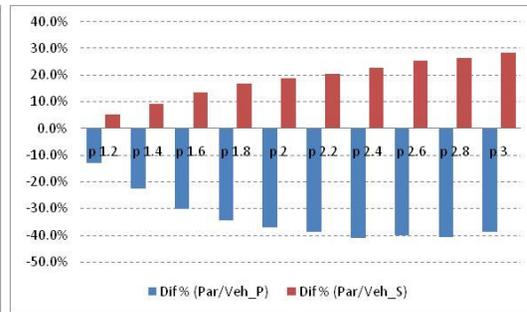


(c) Volume Baixo

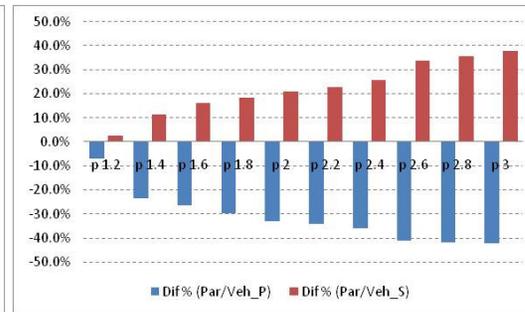
Figura D-35 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

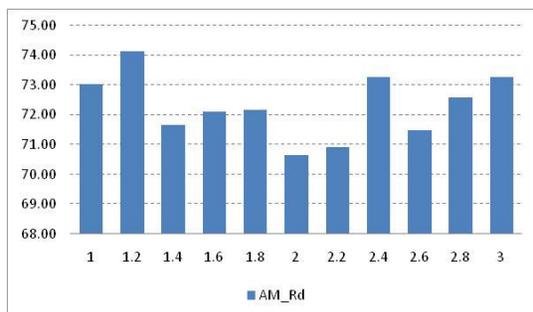


(b) Volume Médio

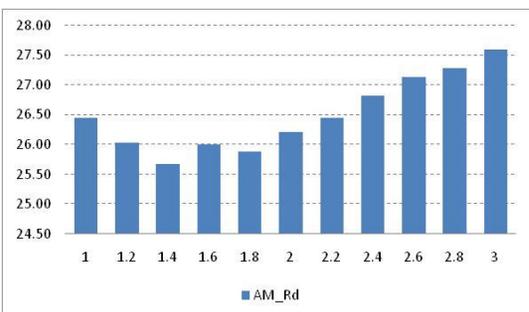


(c) Volume Baixo

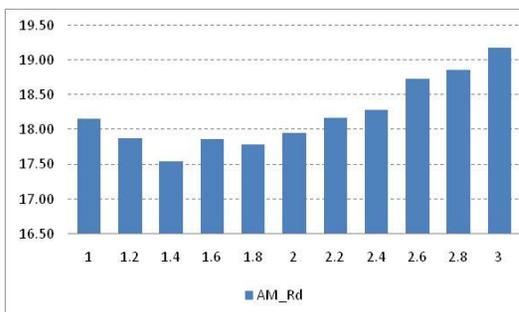
Figura D-36 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

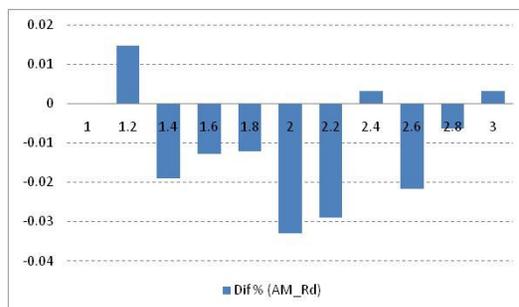


(b) Volume Médio

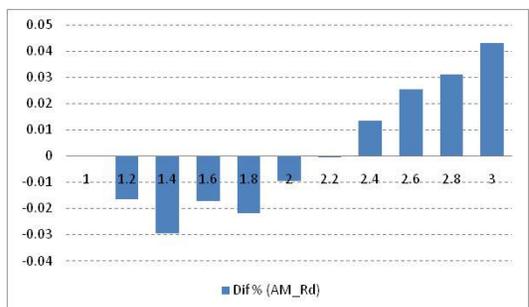


(c) Volume Baixo

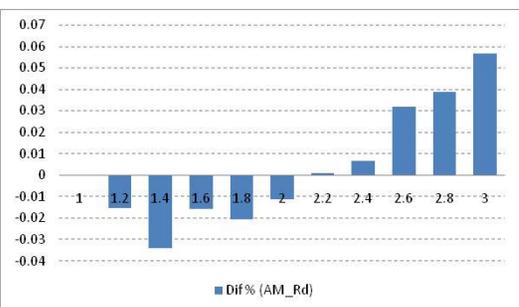
Figura D-37 Atraso Médio para a rede 333



(a) Volume Alto

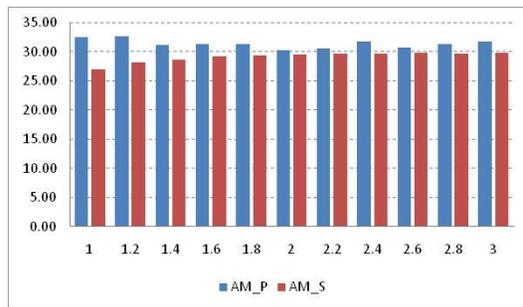


(b) Volume Médio

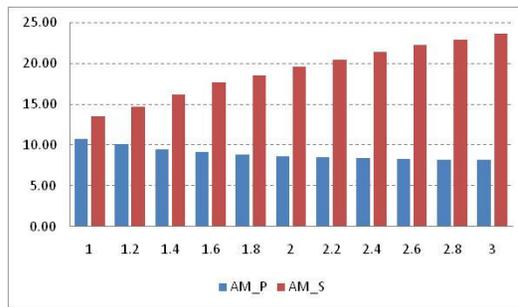


(c) Volume Baixo

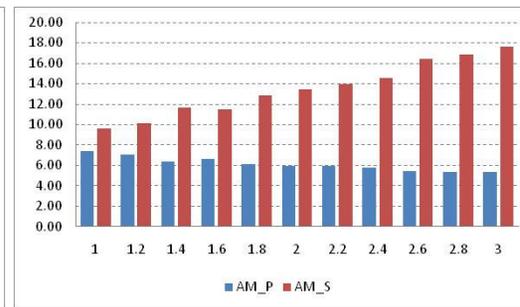
Figura D-38 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio para a rede 333



(a) Volume Alto

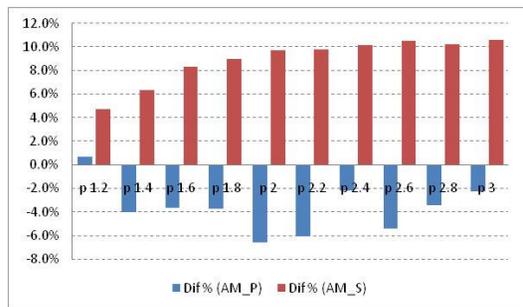


(b) Volume Médio

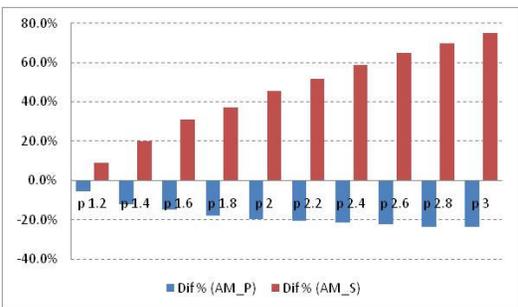


(c) Volume Baixo

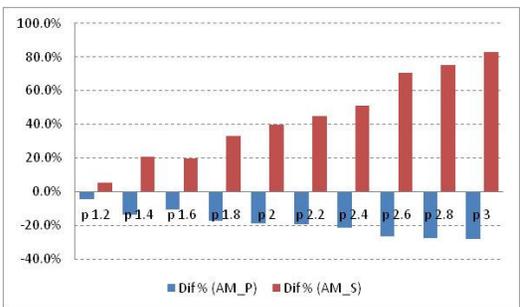
Figura D-39 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

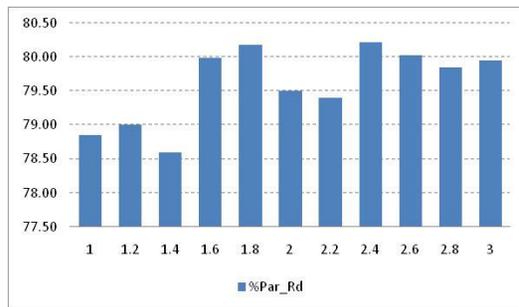


(b) Volume Médio

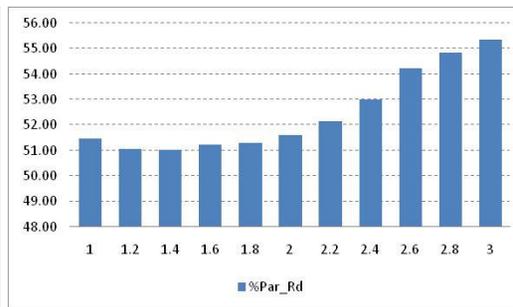


(c) Volume Baixo

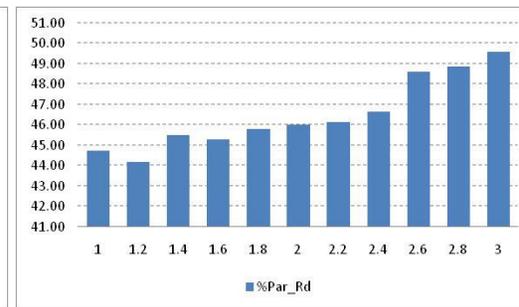
Figura D-40 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

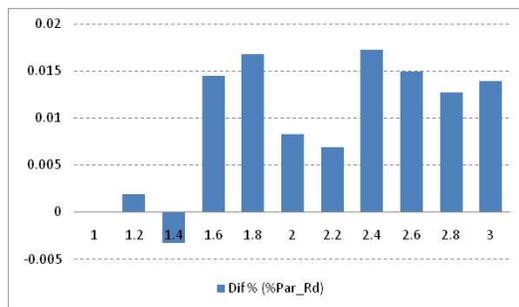


(b) Volume Médio

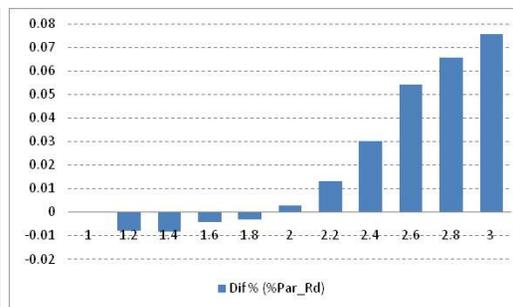


(c) Volume Baixo

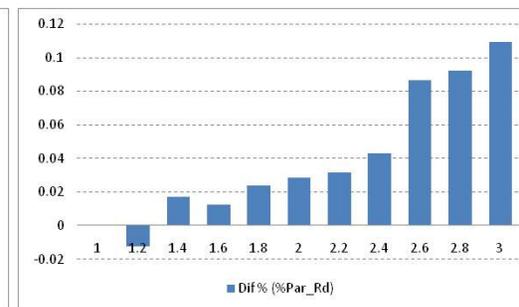
Figura D-41 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333



(a) Volume Alto

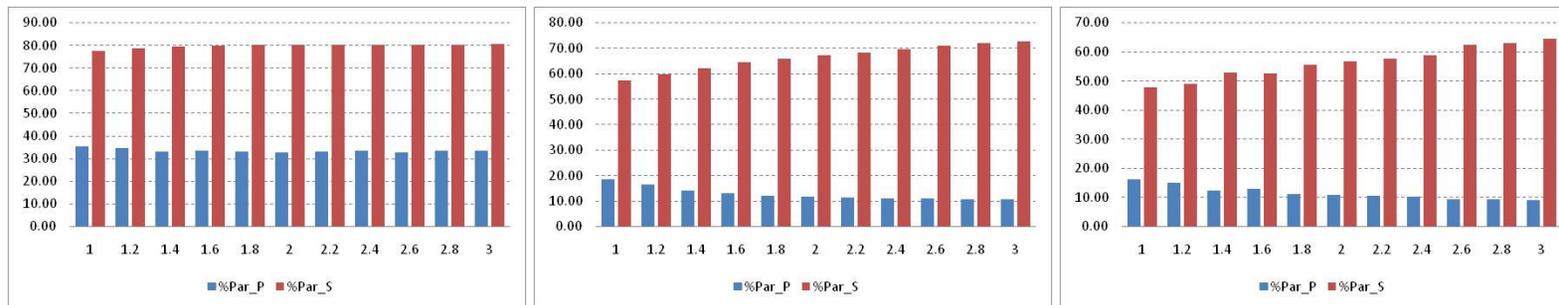


(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-42 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333

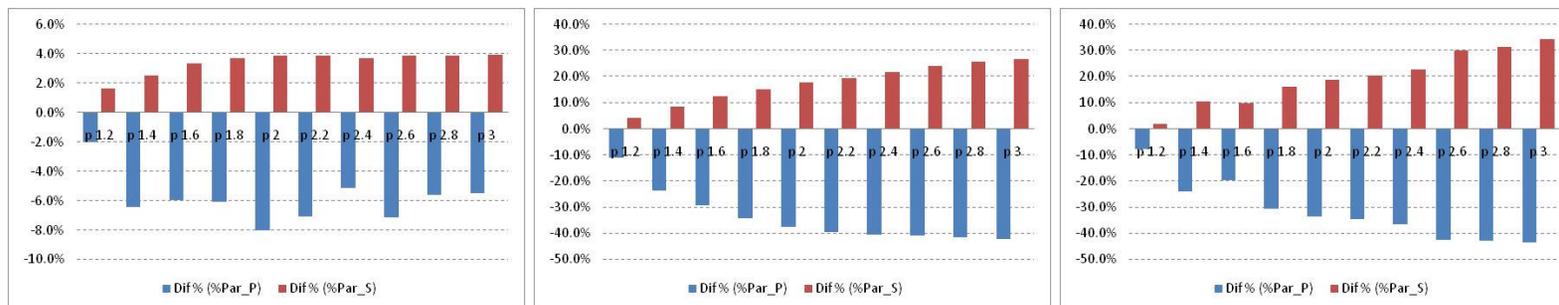


(a) Volume Alto

(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

Figura D-43 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333

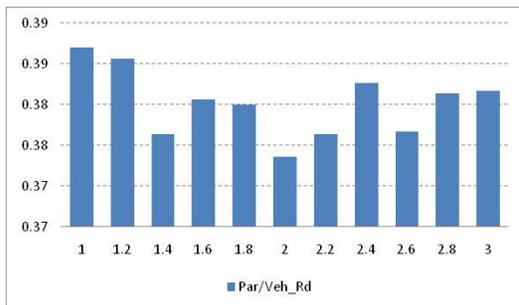


(a) Volume Alto

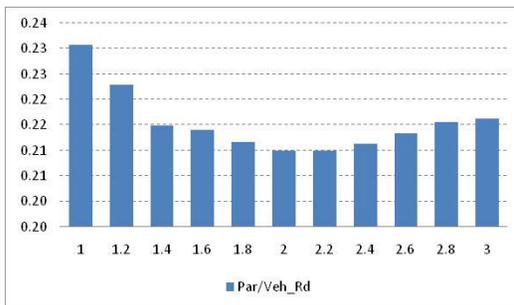
(b) Volume Médio

(c) Volume Baixo

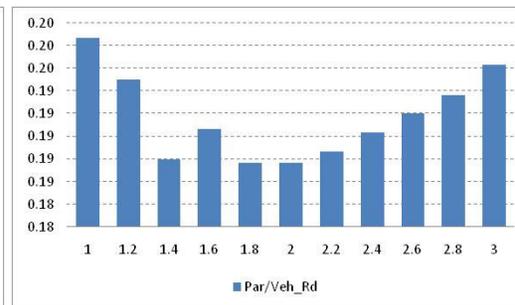
Figura D-44 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

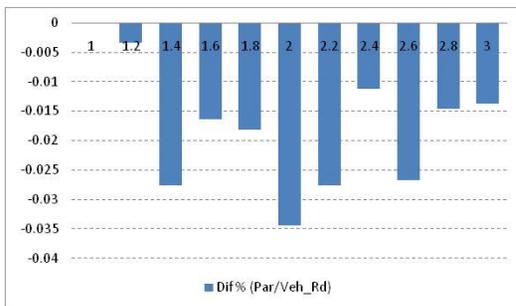


(b) Volume Médio

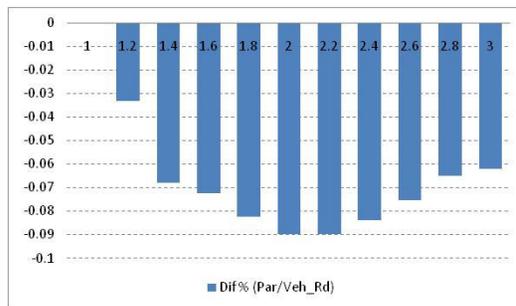


(c) Volume Baixo

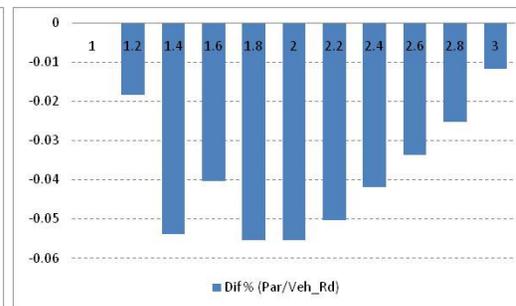
Figura D-45 Paradas por Veículo para a rede 333



(a) Volume Alto

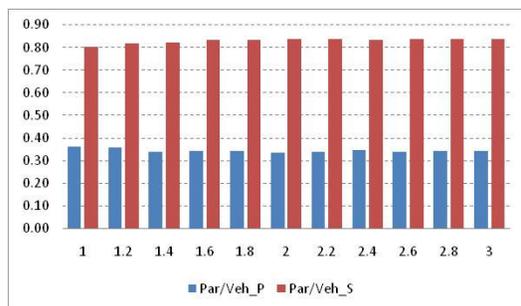


(b) Volume Médio

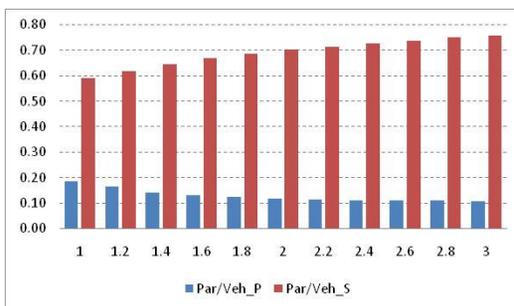


(c) Volume Baixo

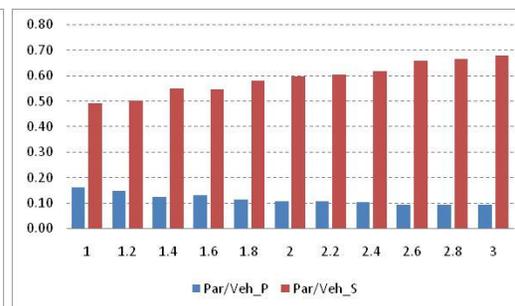
Figura D-46 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo para a rede 333



(a) Volume Alto

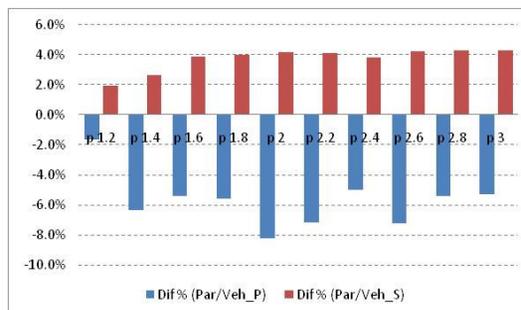


(b) Volume Médio

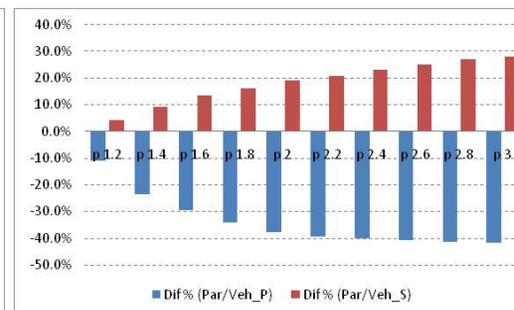


(c) Volume Baixo

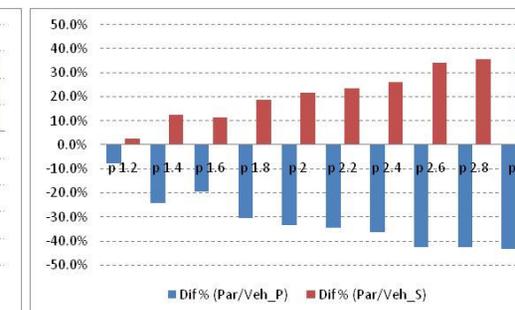
Figura D-47 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

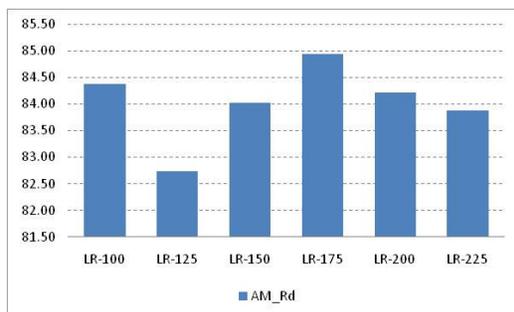


(b) Volume Médio

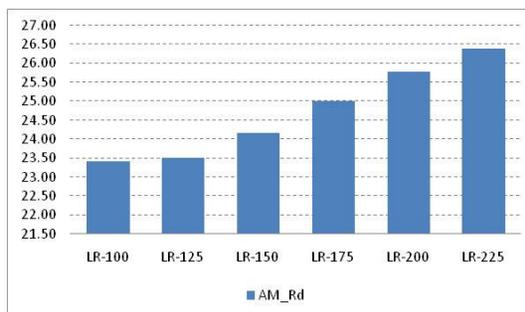


(c) Volume Baixo

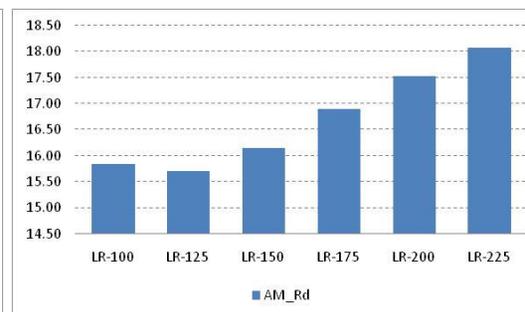
Figura D-48 Diferença percentual de cada caso de p em relação ao caso peso $p=1$ para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

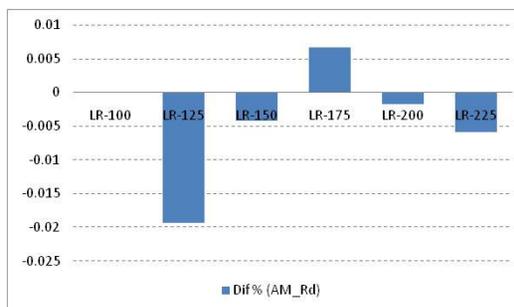


(b) Volume Médio

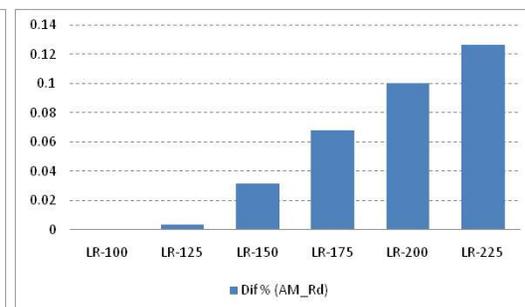


(c) Volume Baixo

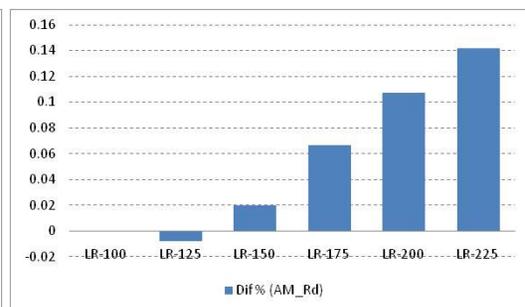
Figura D-49 Atraso Médio para a rede 131



(a) Volume Alto

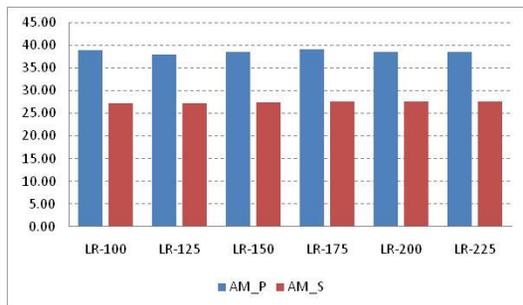


(b) Volume Médio

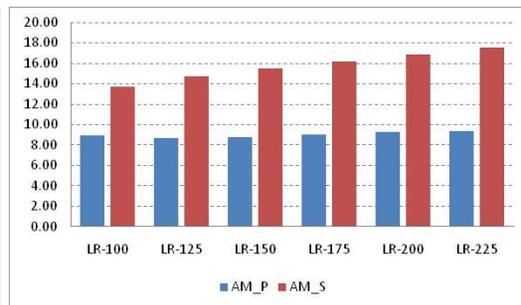


(c) Volume Baixo

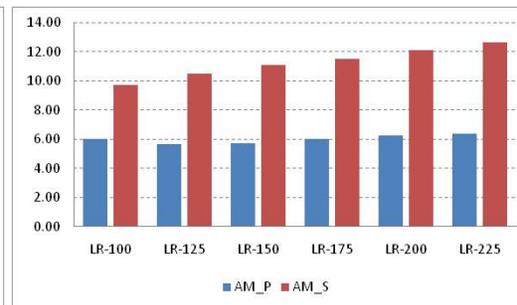
Figura D-50 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio para a rede 131



(a) Volume Alto

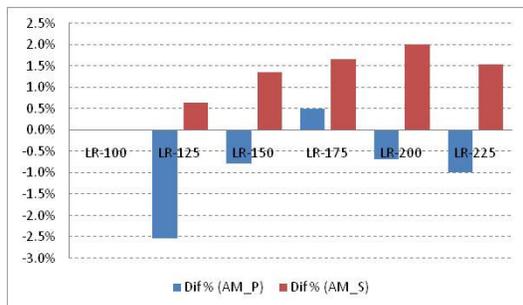


(b) Volume Médio

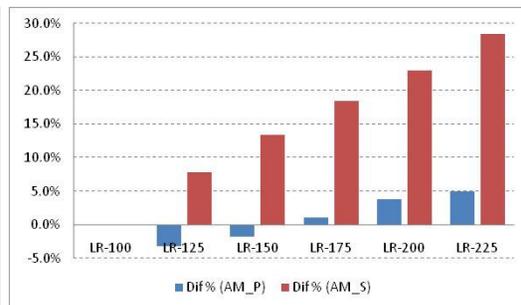


(c) Volume Baixo

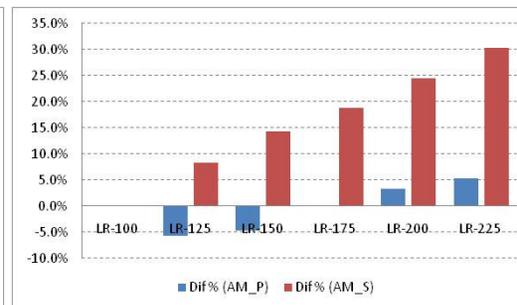
Figura D-51 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

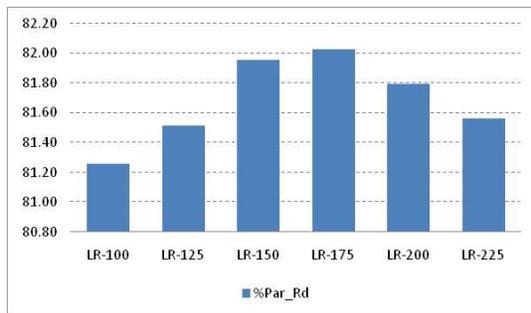


(b) Volume Médio

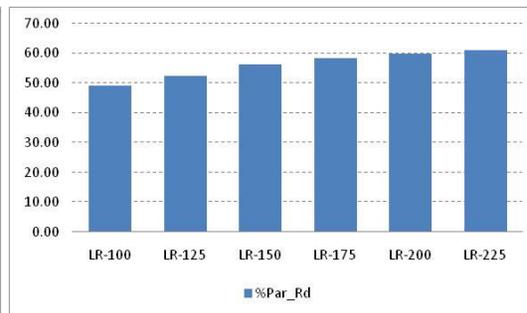


(c) Volume Baixo

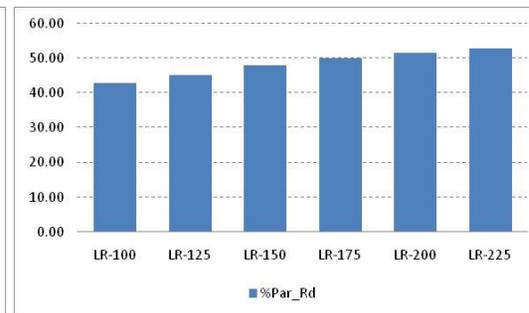
Figura D-52 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

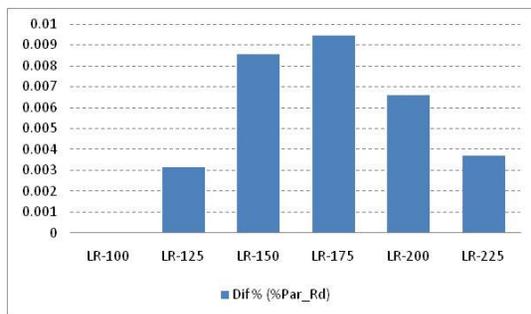


(b) Volume Médio

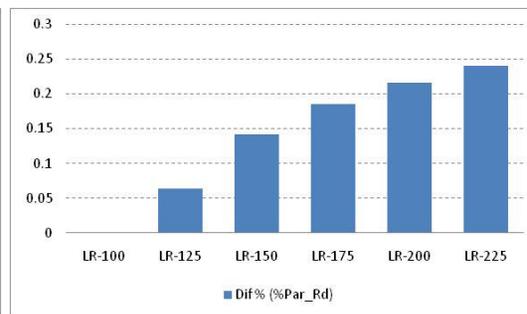


(c) Volume Baixo

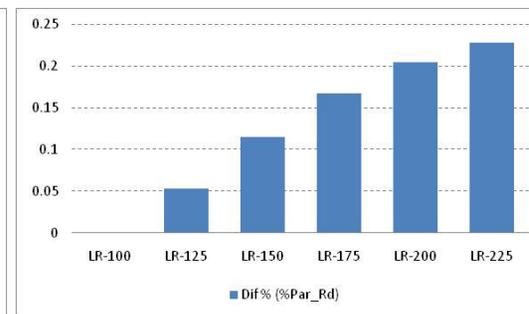
Figura D-53 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131



(a) Volume Alto

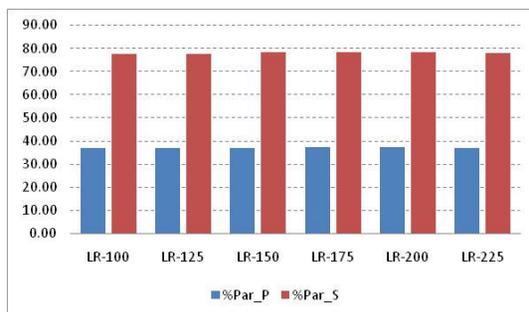


(b) Volume Médio

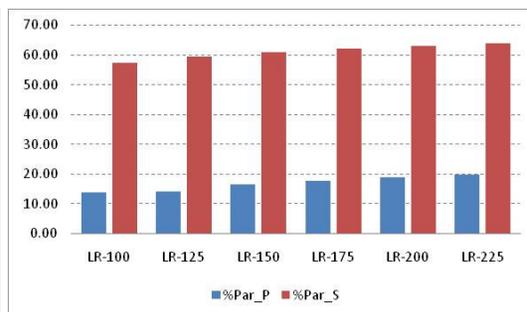


(c) Volume Baixo

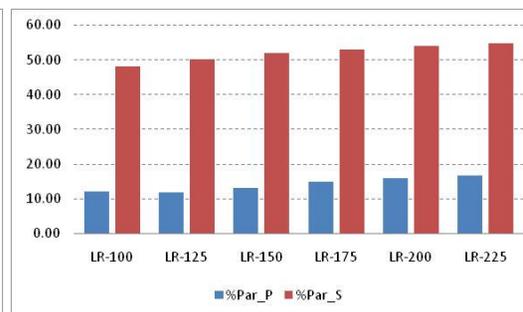
Figura D-54 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 131



(a) Volume Alto

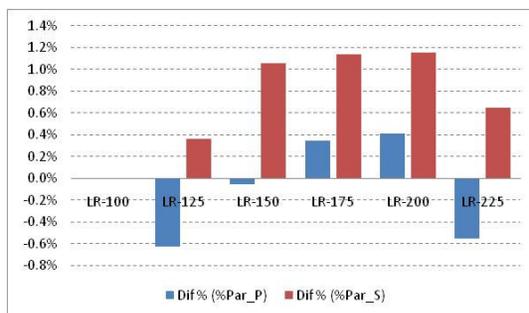


(b) Volume Médio

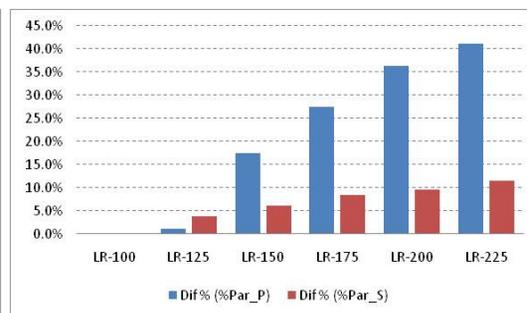


(c) Volume Baixo

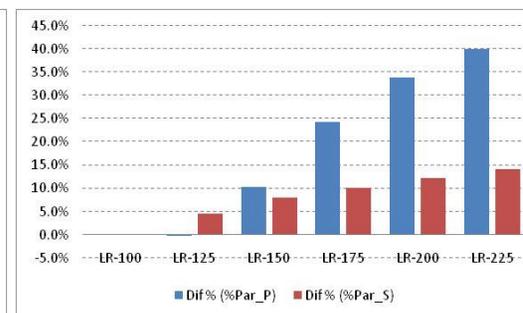
Figura D-55 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

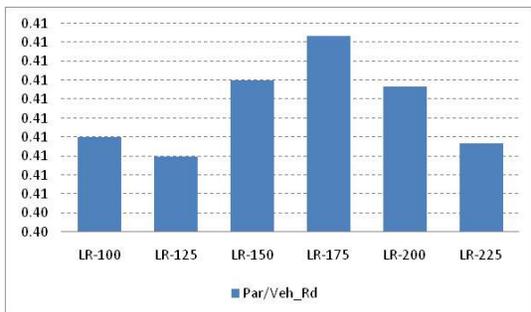


(b) Volume Médio

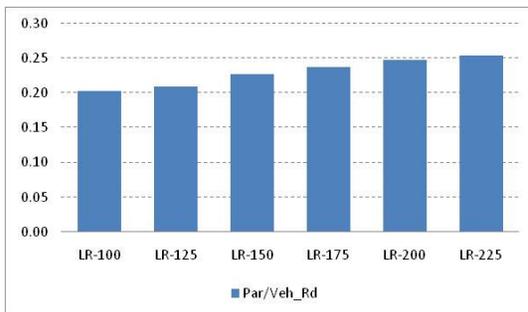


(c) Volume Baixo

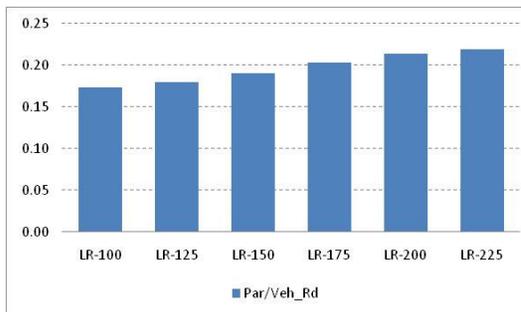
Figura D-56 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

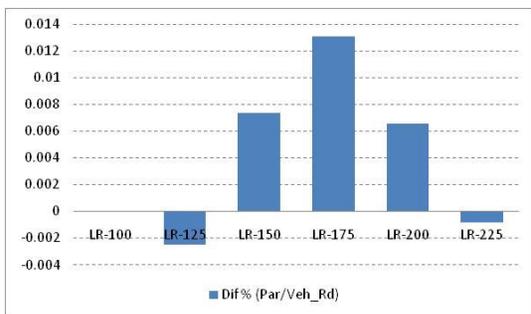


(b) Volume Médio

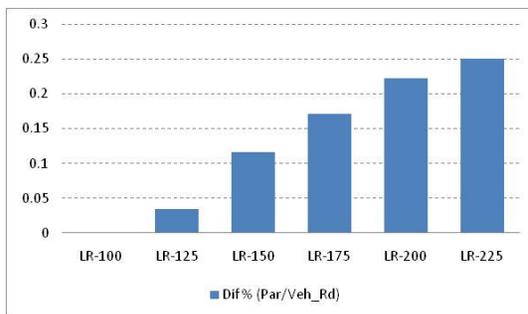


(c) Volume Baixo

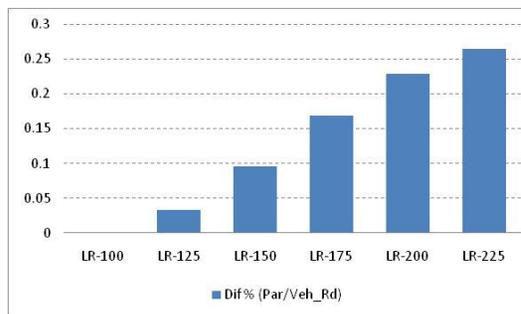
Figura D-57 Paradas por Veículo, para a rede 131



(a) Volume Alto

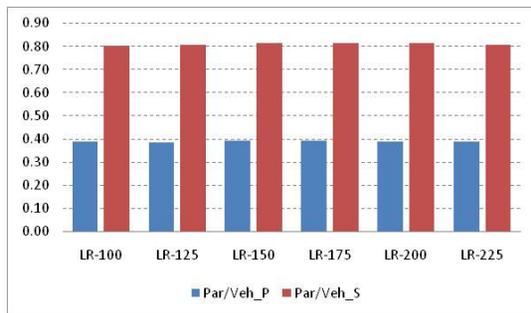


(b) Volume Médio

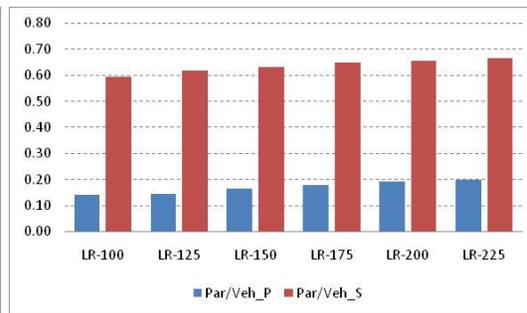


(c) Volume Baixo

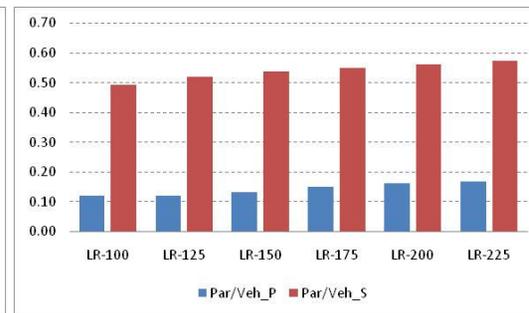
Figura D-58 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Paradas por Veículo, para a rede 131



(a) Volume Alto

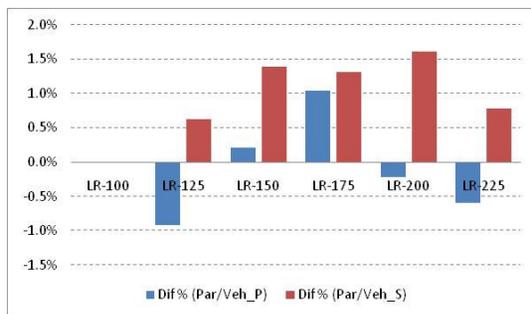


(b) Volume Médio

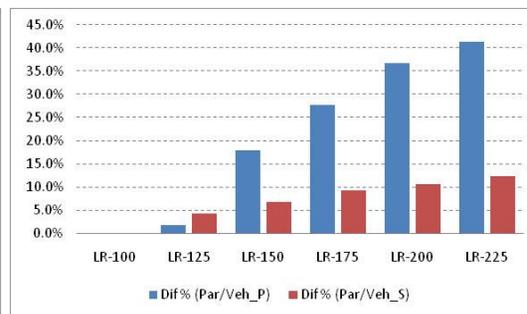


(c) Volume Baixo

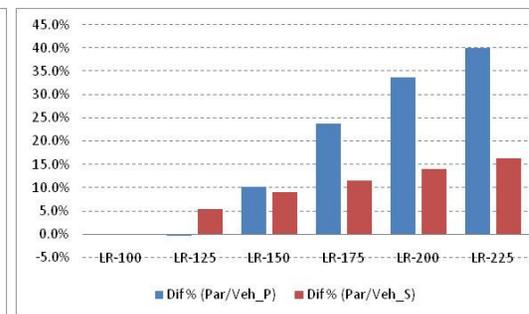
Figura D-59 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

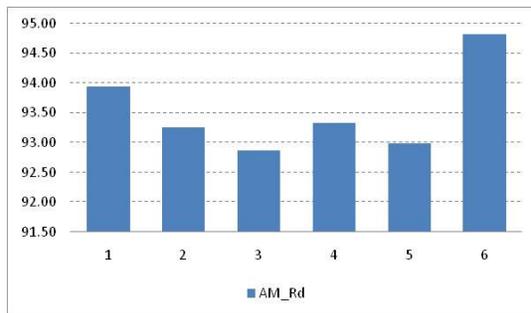


(b) Volume Médio

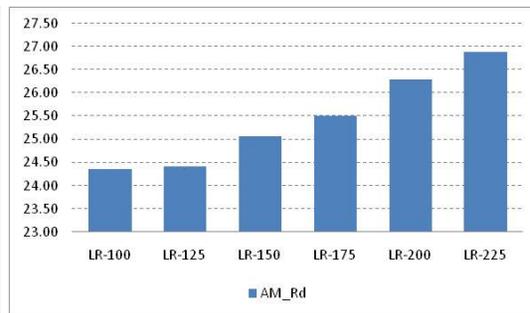


(c) Volume Baixo

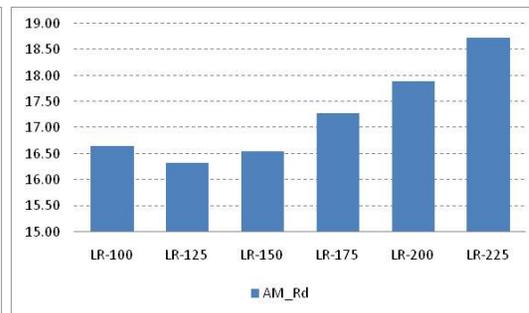
Figura D-60 Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso LR-100 para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 131



(a) Volume Alto

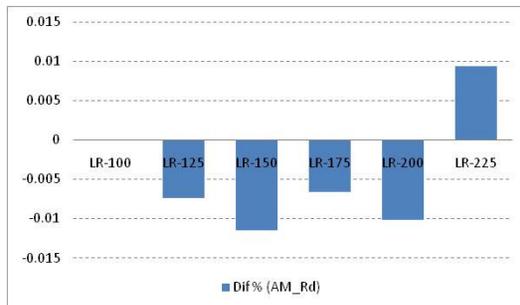


(b) Volume Médio

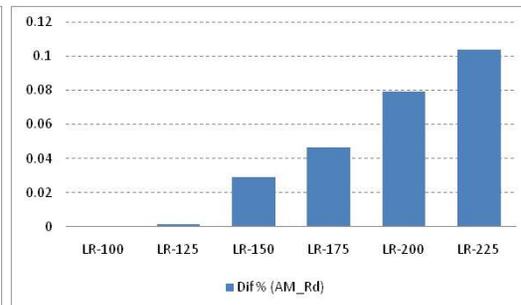


(c) Volume Baixo

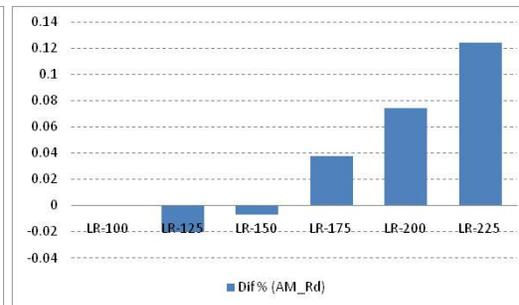
Figura D-61 Atraso Médio para a rede 313



(a) Volume Alto

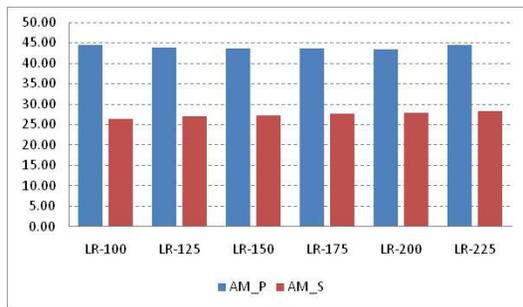


(b) Volume Médio

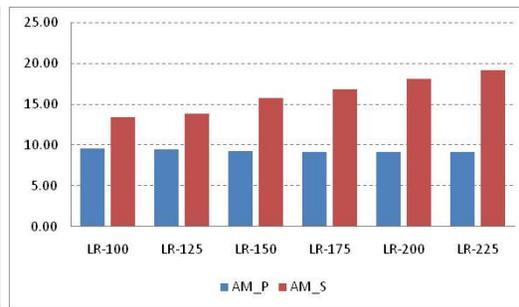


(c) Volume Baixo

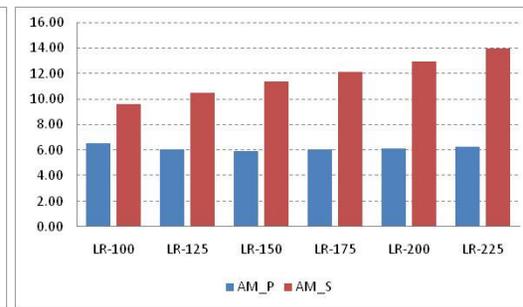
Figura D-62 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio para a rede 313



(a) Volume Alto

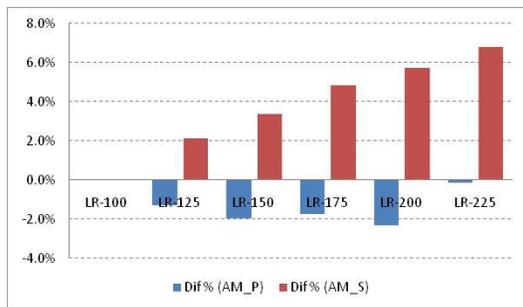


(b) Volume Médio

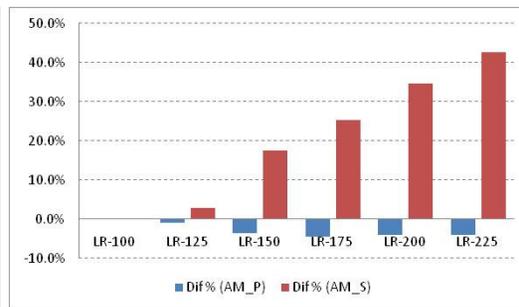


(c) Volume Baixo

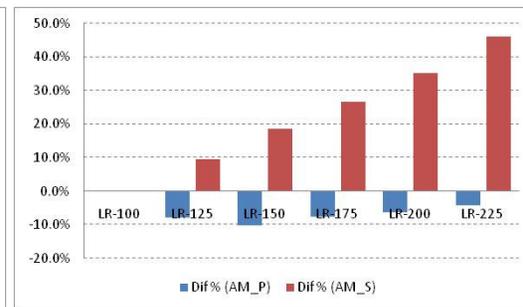
Figura D-63 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

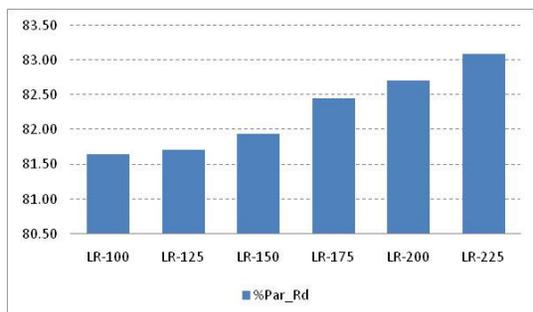


(b) Volume Médio

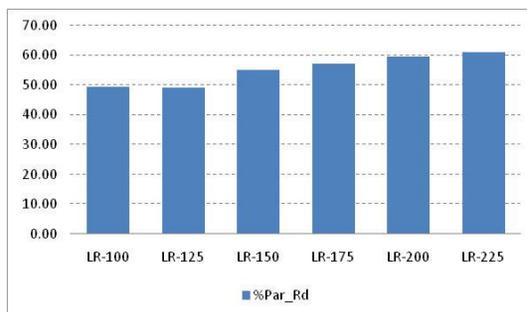


(c) Volume Baixo

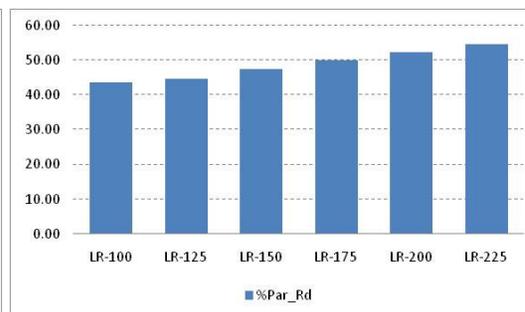
Figura D-64 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

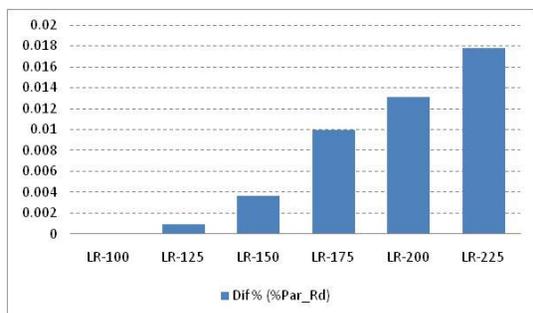


(b) Volume Médio

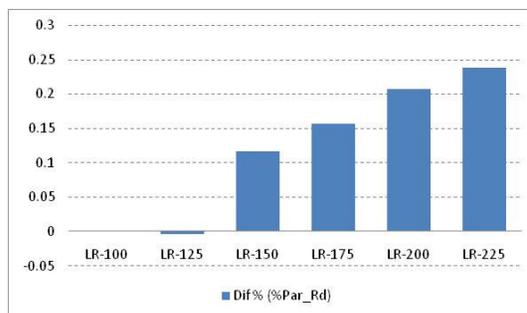


(c) Volume Baixo

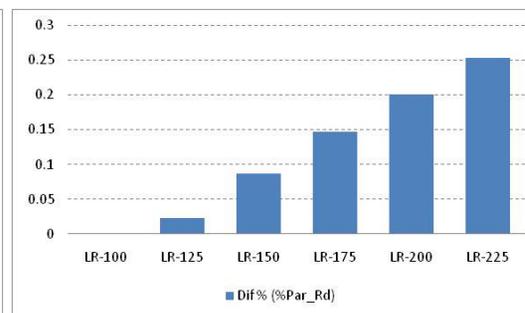
Figura D-65 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313



(a) Volume Alto

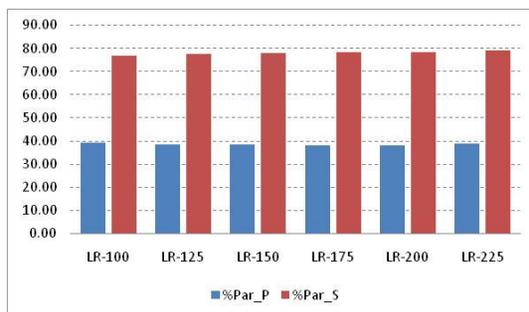


(b) Volume Médio

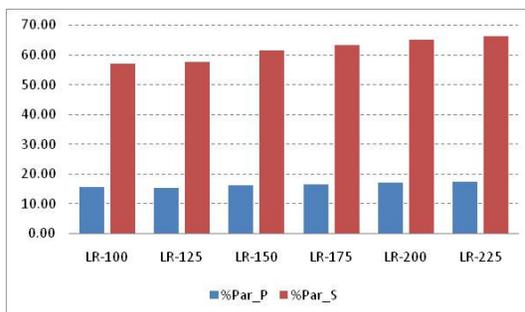


(c) Volume Baixo

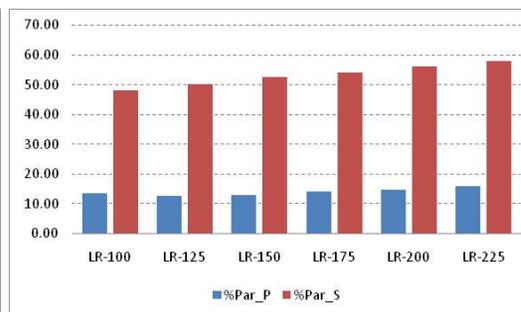
Figura D-66 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 313



(a) Volume Alto

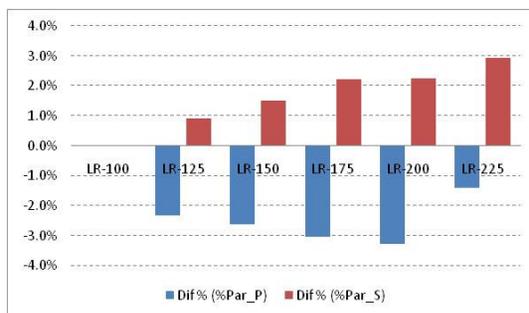


(b) Volume Médio

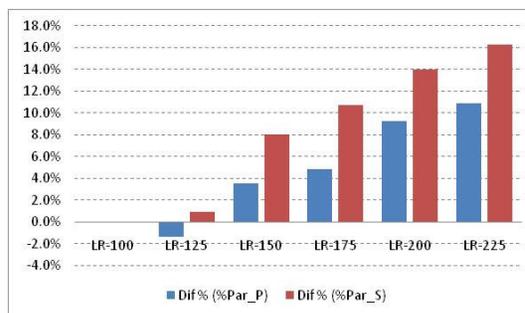


(c) Volume Baixo

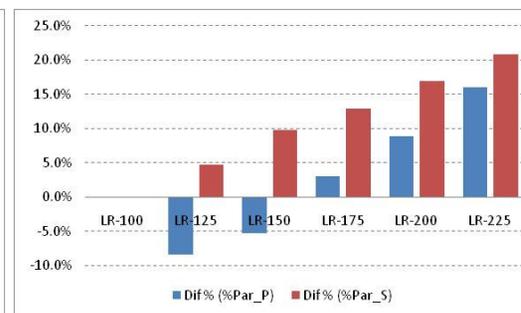
Figura D-67 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

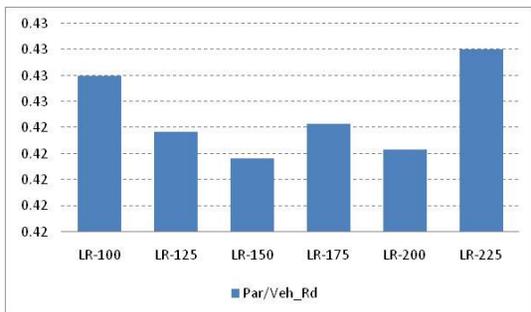


(b) Volume Médio

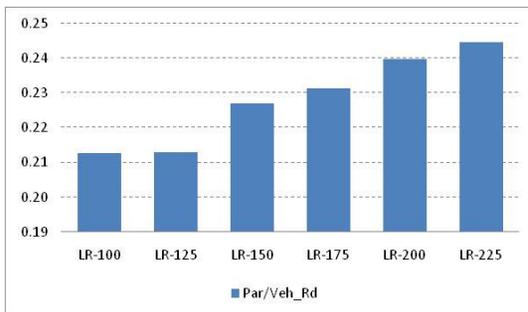


(c) Volume Baixo

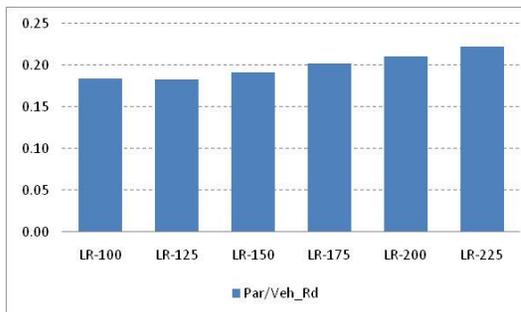
Figura D-68 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

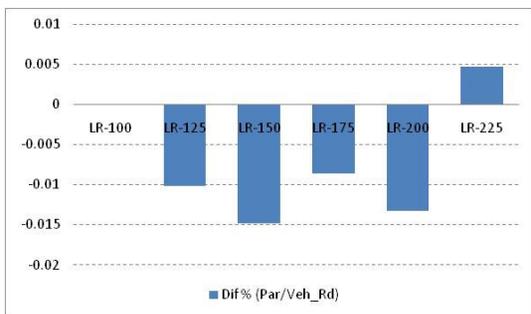


(b) Volume Médio

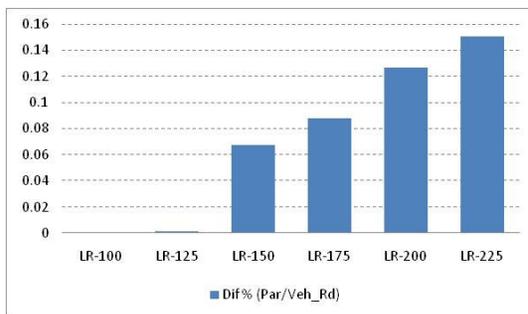


(c) Volume Baixo

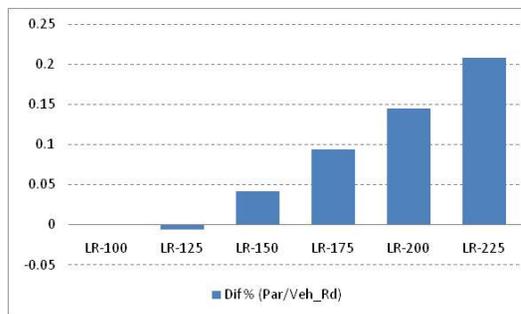
Figura D-69 Paradas por Veículo, para a rede 313



(a) Volume Alto

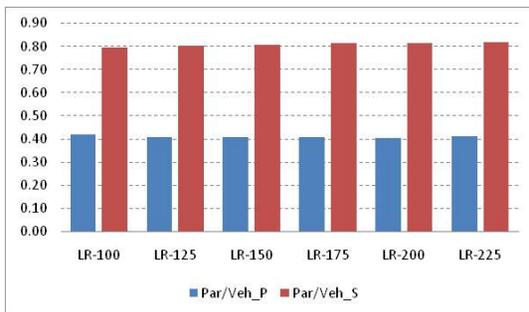


(b) Volume Médio

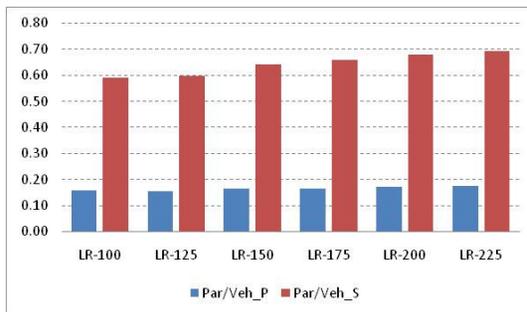


(c) Volume Baixo

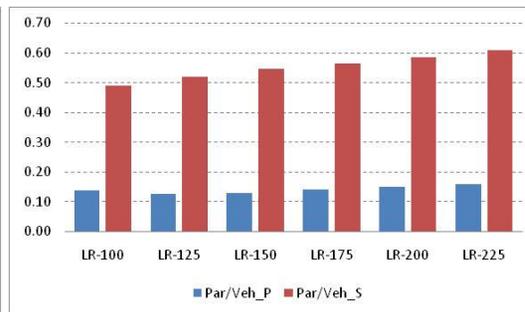
Figura D-70 Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso LR-100 para Paradas por Veículo, para a rede 313



(a) Volume Alto

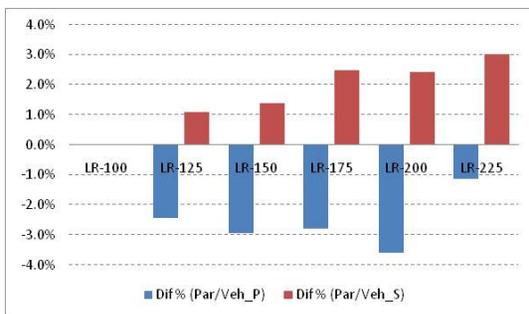


(b) Volume Médio

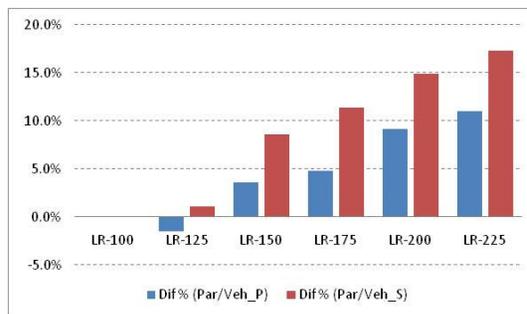


(c) Volume Baixo

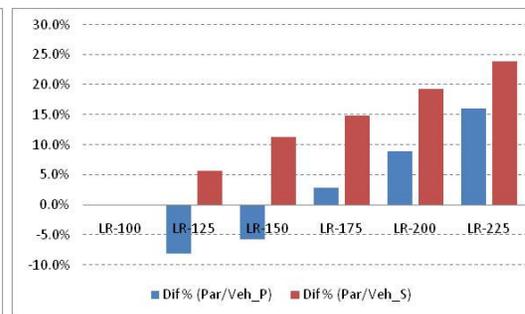
Figura D-71 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

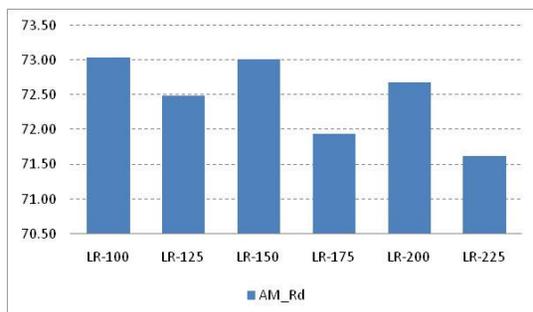


(b) Volume Médio

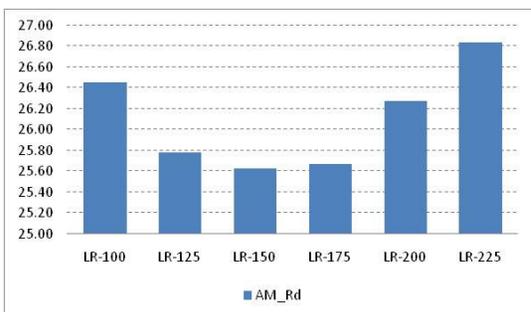


(c) Volume Baixo

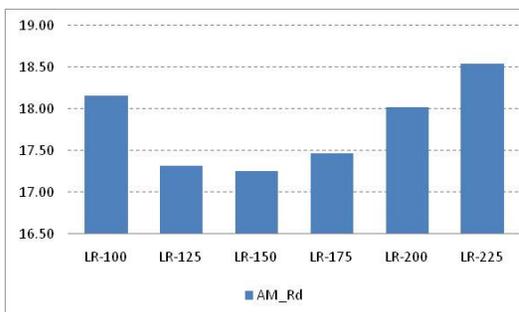
Figura D-72 Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso LR-100 para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 313



(a) Volume Alto

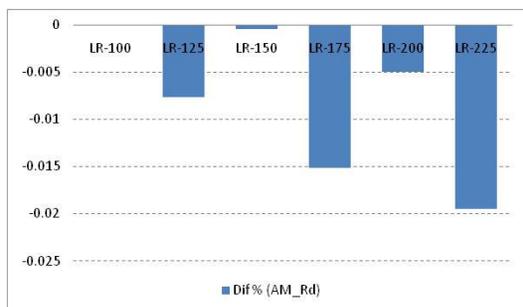


(b) Volume Médio

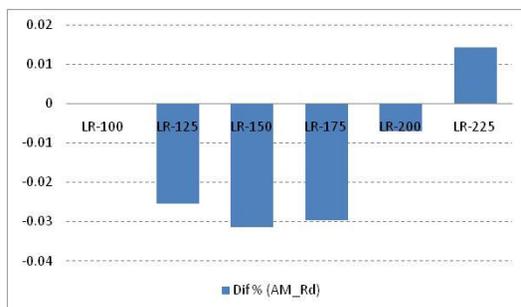


(c) Volume Baixo

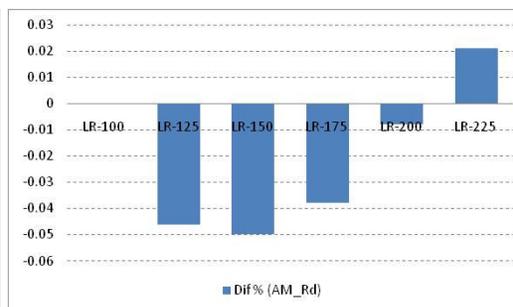
Figura D-73 Atraso Médio para a rede 333



(a) Volume Alto

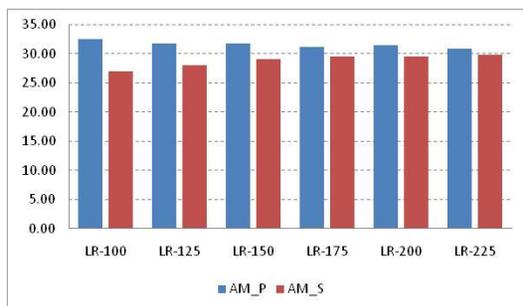


(b) Volume Médio

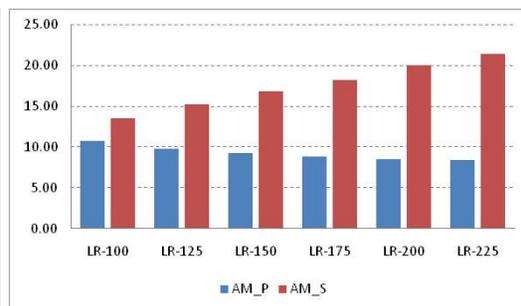


(c) Volume Baixo

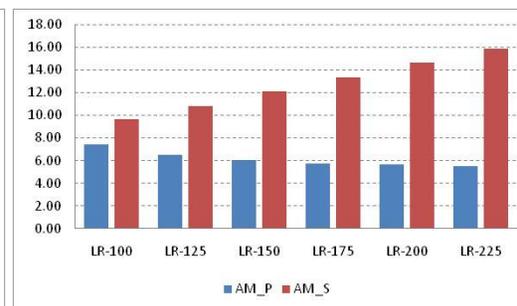
Figura D-74 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio para a rede 333



(a) Volume Alto

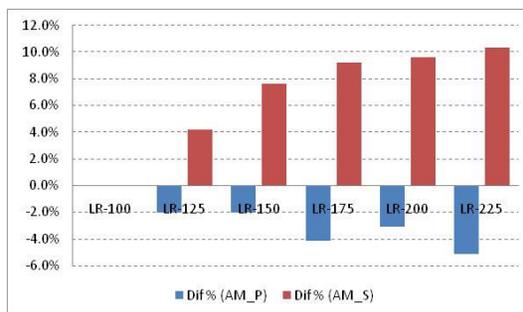


(b) Volume Médio

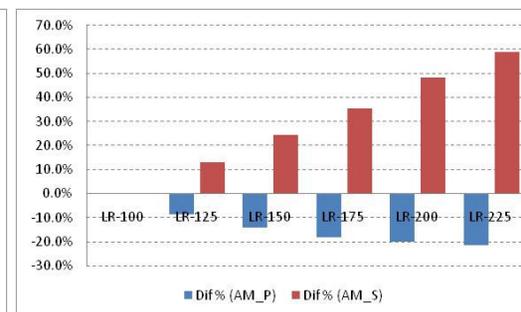


(c) Volume Baixo

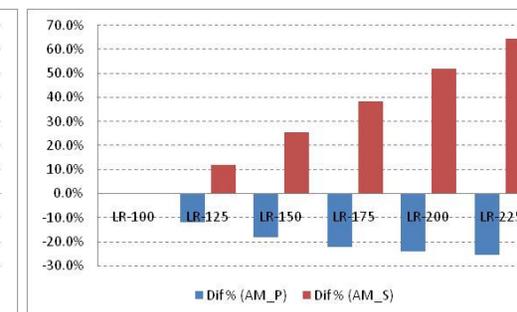
Figura D-75 Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

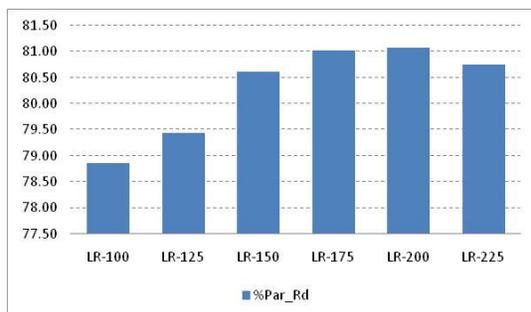


(b) Volume Médio

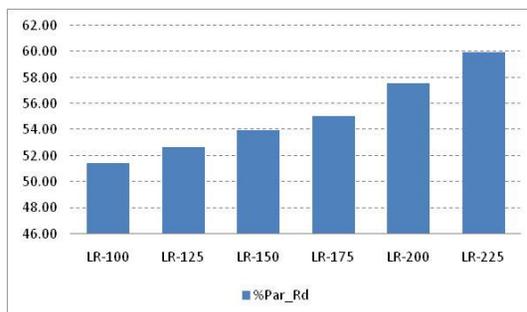


(c) Volume Baixo

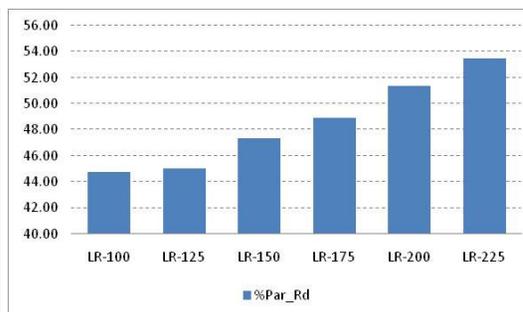
Figura D-76 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Atraso Médio por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

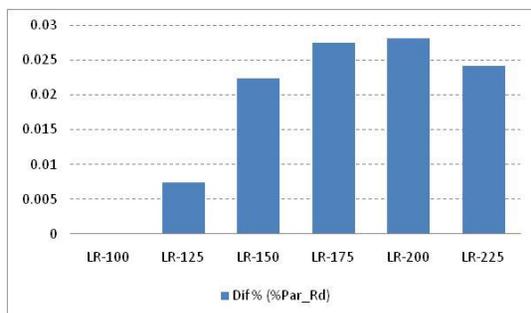


(b) Volume Médio

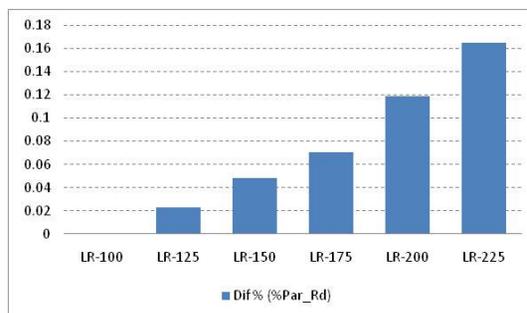


(c) Volume Baixo

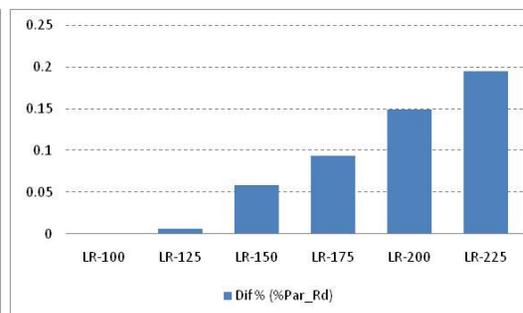
Figura D-77 Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333



(a) Volume Alto

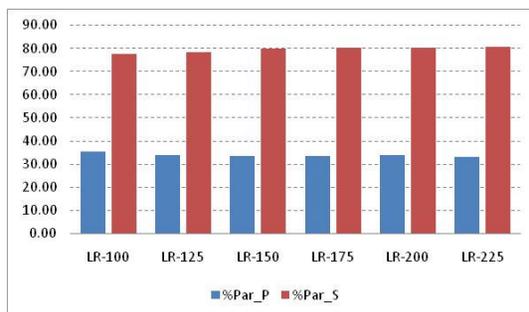


(b) Volume Médio

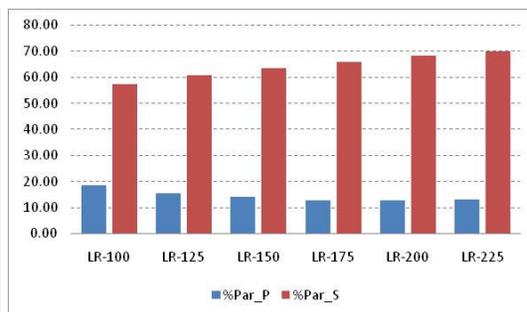


(c) Volume Baixo

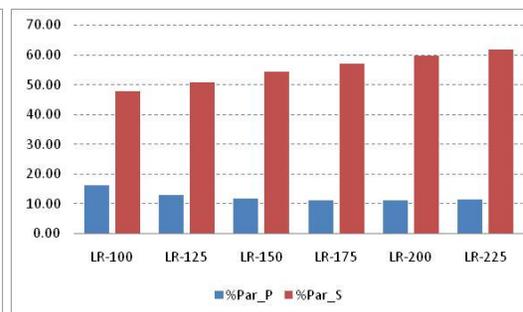
Figura D-78 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares, para a rede 333



(a) Volume Alto

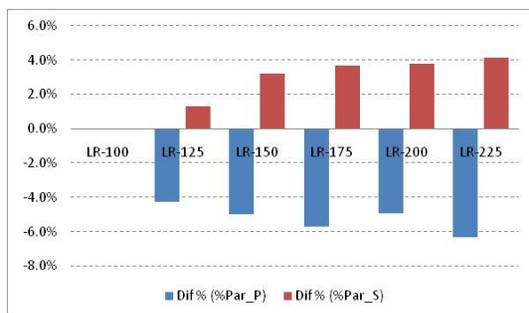


(b) Volume Médio

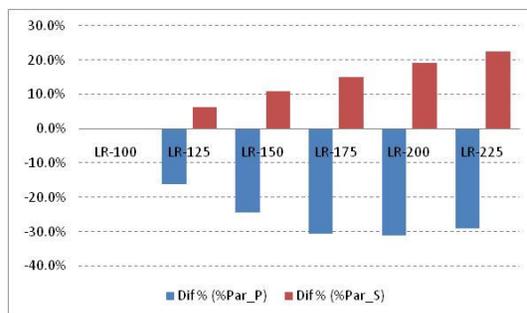


(c) Volume Baixo

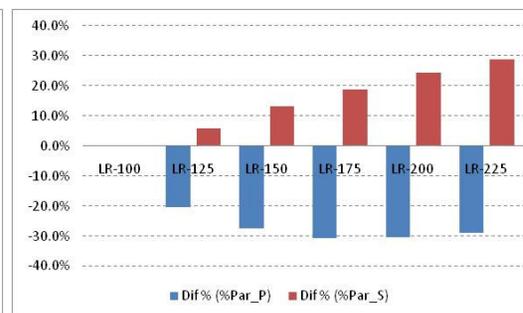
Figura D-79 Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

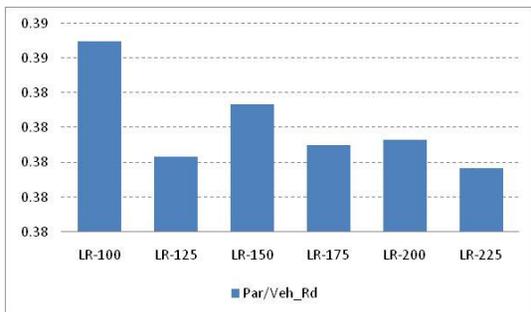


(b) Volume Médio

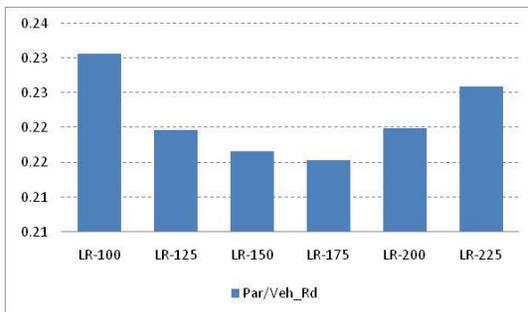


(c) Volume Baixo

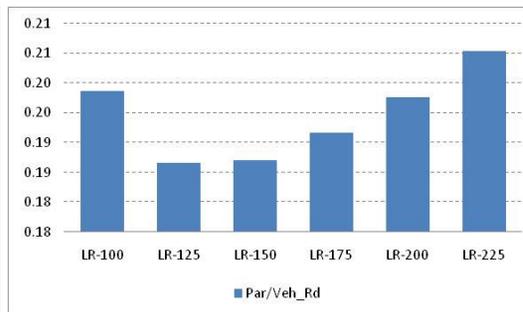
Figura D-80 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Percentual de Paradas Veiculares por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto

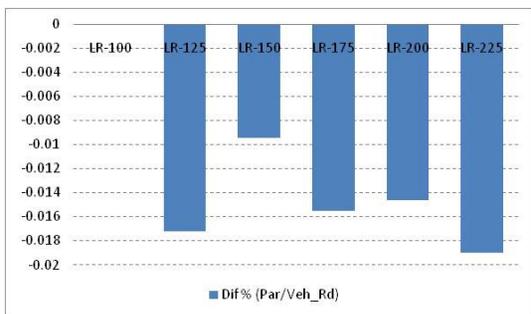


(b) Volume Médio

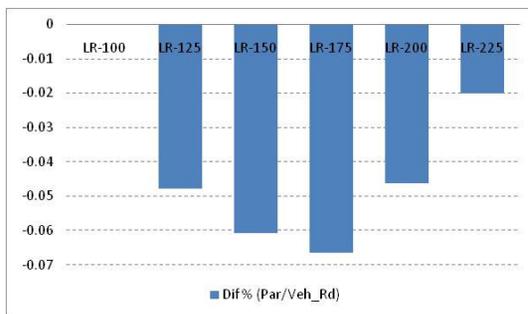


(c) Volume Baixo

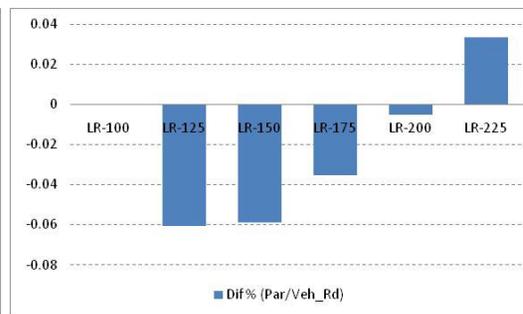
Figura D-81 Paradas por Veículo, para a rede 333



(a) Volume Alto

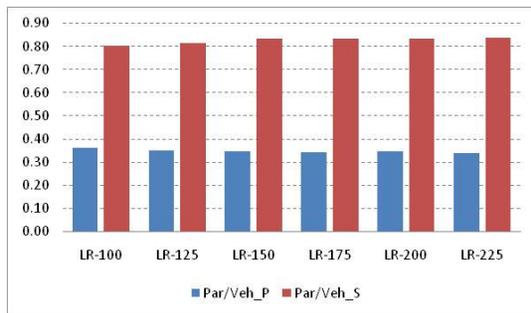


(b) Volume Médio

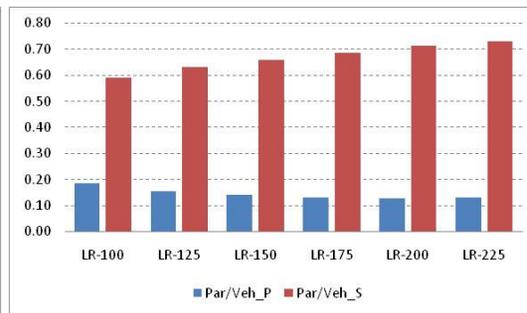


(c) Volume Baixo

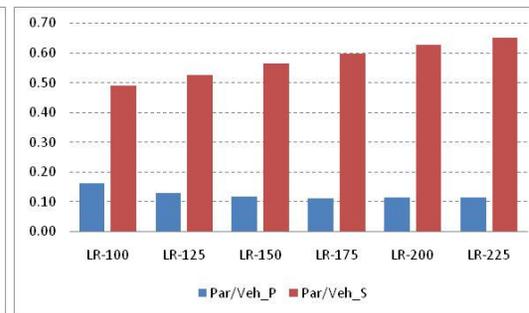
Figura D-82 Diferença percentual de cada caso de *LR* em relação ao caso *LR-100* para Paradas por Veículo, para a rede 333



(a) Volume Alto

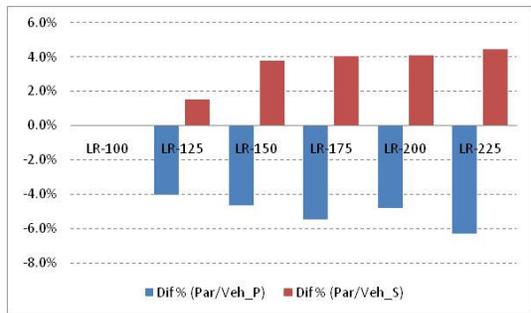


(b) Volume Médio

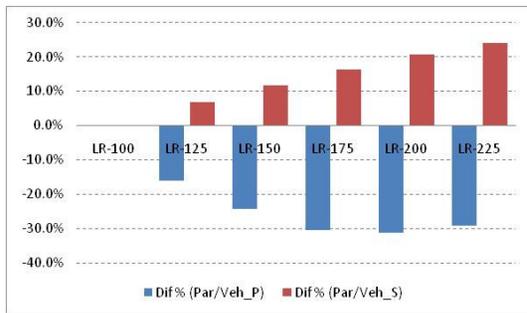


(c) Volume Baixo

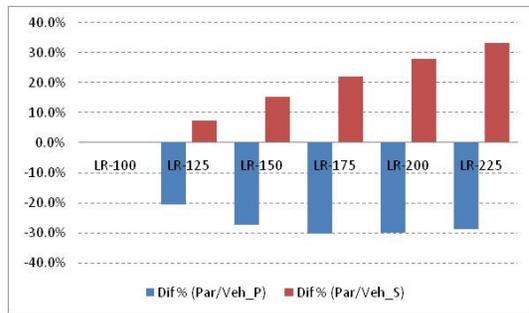
Figura D-83 Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333



(a) Volume Alto



(b) Volume Médio



(c) Volume Baixo

Figura D-84 Diferença percentual de cada caso de LR em relação ao caso LR-100 para Paradas por Veículo por tipo de via, para a rede 333

Quadro D-1 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 111 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio			% de Paradas veiculares			Paradas por Veiculo			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
111	A	1,0	-	1	99.15	A	1	84.4	A	1	0.45	-	-	-
		1,2	-	1.2	95.14	A	2.4	84.2	B	3	0.42	0.0069	-	-
		1,4	-	3	94.94	A	2.6	84.2	B	2.8	0.42	0.0022	-	-
		1,6	-	2.8	94.72	A	1.4	84.2	B	1.2	0.42	<.0001	-	<.0001
		1,8	-	2.6	94.37	A	2.2	84.1	B	2.4	0.42	0.0003	-	-
		2,0	-	1.4	94.30	A	2.8	84.1	B	1.4	0.42	0.0005	-	-
		2,2	-	2	93.90	A	3	84.1	B	2.2	0.42	0.0013	-	<.0001
		2,4	-	2.4	93.72	A	1.8	84.0	B	2.6	0.42	0.0007	-	-
		2,6	-	2.2	93.61	A	1.6	84.0	B	2	0.42	0.0011	-	-
		2,8	-	1.8	92.76	A	2	84.0	B	1.8	0.41	0.0007	-	-
	3,0	-	1.6	92.71	A	1.2	83.9	B	1.6	0.41	0.0039	-	-	
	M	1,0	-	3	22.35	D C	3	51.8	-	3	0.19	-	-	-
		1,2	-	2.8	22.00	F	2.8	51.4	-	1	0.19	0.0027	-	0.0001
		1,4	-	2.6	21.84	E F	2.6	51.2	-	2.6	0.19	0.0002	-	<.0001
		1,6	-	2.4	21.64	E F	2.4	50.1	-	2.8	0.19	0.0019	-	<.0001
		1,8	-	1	21.22	D E F	1	49.3	-	2.4	0.19	0.0202	-	<.0001
		2,0	-	2.2	21.16	D E	2.2	49.2	-	2.2	0.18	0.3368	-	0.0001
		2,2	-	2	20.86	D C	2	48.9	-	2	0.18	0.7573	-	0.0020
		2,4	-	1.8	20.62	B C	1.8	48.3	-	1.2	0.18	0.0414	-	0.0494
		2,6	-	1.2	20.38	B A	1.4	47.9	-	1.6	0.18	0.0053	<.0001	0.7793
		2,8	-	1.6	20.36	A	1.6	47.9	-	1.8	0.18	0.0024	-	0.5058
	3,0	-	1.4	20.19	A	1.2	47.7	-	1.4	0.18	0.0001	-	0.3575	
	B	1,0	E F	3	15.79	F	3	47.2257	-	3	0.18	-	-	-
		1,2	F	2.8	15.52	F	2.8	47.1183	-	2.8	0.18	-	-	0.9668
		1,4	F	2.6	15.19	E	2.6	45.7287	-	2.6	0.17	0.2535	-	0.0324
		1,6	D E F	2.4	14.68	E	2.4	44.543	-	2.4	0.17	-	-	0.0005
		1,8	D E F	2.2	14.42	D E	2.2	44.2313	-	2.2	0.17	-	-	0.0012
		2,0	D E	2	14.17	D C E	2	43.5583	-	2	0.16	-	-	0.0003
		2,2	D C	1.8	14.04	D C	1.8	43.525	-	1.6	0.16	-	-	<.0001
		2,4	C	1.6	14.02	C	1.6	43.2023	-	1.8	0.16	-	-	<.0001
2,6		B	1	13.74	B	1.4	42.8373	-	1.4	0.16	-	<.0001	<.0001	
2,8		B A	1.2	13.67	A	1.2	41.4003	-	1	0.16	-	-	<.0001	
3,0	A	1.4	13.65	A	1	41.357	-	1.2	0.16	-	-	<.0001		

Quadro D-2 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 131 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio			% de Paradas veiculares			Paradas por Veículo			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
131	A	1,0	A	1	84.37	-	2	82.6	A	1	0.41	-	-	-
		1,2	A	3	83.91	-	2.8	82.5	A	3	0.41	-	0.0374	-
		1,4	A	2.8	82.63	-	1.8	82.5	A	2.8	0.40	-	0.2387	-
		1,6	A	2.2	81.89	-	3	82.4	A	2.2	0.40	-	0.0407	0.1061
		1,8	A	1.2	81.60	-	2.2	82.4	A	1.2	0.40	-	0.045	0.0544
		2,0	A	1.6	81.55	-	1.6	82.3	A	2	0.40	-	0.0131	0.0648
		2,2	A	2	81.36	-	1.2	82.2	A	2.6	0.40	-	0.0633	-
		2,4	A	2.6	81.26	-	2.6	82.1	A	1.6	0.40	-	0.6222	-
		2,6	A	1.8	81.05	-	1.4	81.8	A	1.8	0.40	-	0.1632	-
	2,8	A	1.4	80.74	-	2.4	81.4	A	2.4	0.39	-	0.0142	-	
	3,0	A	2.4	80.08	-	1	81.3	A	1.4	0.39	-	0.0085	-	
	M	1,0	-	3	25.00	G E F	3	53.4	-	1	0.20	-	-	-
		1,2	-	2.8	24.78	G	2.8	52.7	-	3	0.20	0.4278	-	0.0157
		1,4	-	2.6	24.59	G F	2.6	51.9	-	2.8	0.20	0.2138	-	0.0016
		1,6	-	2.4	24.34	G F	2.4	51.3	-	2.6	0.20	0.7350	-	0.0002
		1,8	-	2.2	23.81	G E F	2.2	50.5	-	1.2	0.20	0.9296	0.3906	<.0001
		2,0	-	2	23.61	D E F	2	50.2	-	2.4	0.20	0.2626	-	<.0001
		2,2	-	1	23.43	D E	1.8	49.7	-	1.4	0.20	0.0566	-	0.0007
		2,4	-	1.8	23.38	D C	1	49.2	-	2.2	0.19	0.0012	-	0.0082
		2,6	-	1.6	23.23	B C	1.4	49.1	-	1.6	0.19	0.0002	-	0.0639
	2,8	-	1.2	23.15	B A	1.6	49.1	-	2	0.19	<.0001	-	0.1846	
	3,0	-	1.4	23.14	A	1.2	48.4	-	1.8	0.19	<.0001	-	0.6426	
	B	1,0	D E	3	17.39	E	3	48.0	-	3	0.18	-	-	-
		1,2	D E	2.8	17.20	E	2.8	47.6	-	2.8	0.18	-	-	0.3265
		1,4	E	2.6	16.93	E D	2.6	47.1	-	2.6	0.18	-	-	0.0781
		1,6	D E	2.4	16.44	C D	2.4	45.5	-	2.4	0.18	-	-	0.5768
		1,8	D E	2.2	16.19	C D	2.2	45.0	-	2.2	0.18	-	-	0.4543
		2,0	D E	2	15.87	C B D	2	44.5	-	1	0.17	-	-	0.3931
		2,2	D C	1	15.84	C B	1.6	44.3	-	1.6	0.17	-	-	0.4182
		2,4	B C	1.2	15.82	B	1.8	44.2	-	2	0.17	-	-	0.1154
		2,6	B A	1.8	15.82	A	1.4	43.9	-	1.8	0.17	-	-	0.0017
	2,8	A	1.6	15.79	A	1	42.9	-	1.2	0.17	-	-	<.0001	
	3,0	A	1.4	15.53	A	1.2	42.9	-	1.4	0.17	-	-	<.0001	

Quadro D-3 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 313 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio			% de Paradas veiculares			Paradas por Veículo			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
313	A	1,0	A	1	93.95	A	3	82.9	A	1	0.43	-	-	-
		1,2	A	2.8	89.70	A	2.4	82.6	B A	2.8	0.41	-	-	-
		1,4	A	3	88.38	A	2.6	82.6	B	3	0.41	-	-	<.0001
		1,6	A	1.2	88.35	A	2.8	82.6	B	1.2	0.41	-	-	-
		1,8	A	2.6	87.09	A	2.2	82.3	B	2.4	0.41	-	-	-
		2,0	A	2.4	86.79	A	2	82.2	B	2.6	0.41	-	0.2192	-
		2,2	A	2	85.44	A	1.6	81.6	B	2	0.40	-	-	-
		2,4	A	1.4	85.42	A	1	81.6	B	2.2	0.40	-	-	-
		2,6	A	2.2	85.41	A	1.2	81.6	B	1.4	0.40	-	-	-
		2,8	A	1.6	85.31	A	1.4	81.5	B A	1.6	0.40	-	-	-
	3,0	A	1.8	84.75	A	1.8	81.5	B A	1.8	0.40	-	-	-	
	M	1,0	E D	3	26.01	E	3	54.2	-	1	0.21	-	-	-
		1,2	E	2.8	25.62	E	2.8	53.3	-	3	0.21	-	-	0.0095
		1,4	E	2.6	25.35	D E	2.6	52.7	-	1.2	0.21	-	-	0.0002
		1,6	E	2.4	24.89	E	2.4	51.3	-	2.8	0.21	-	-	<.0001
		1,8	E D	2.2	24.58	D E	2.2	50.9	-	2.6	0.20	-	-	<.0001
		2,0	E D	2	24.39	D C E	2	50.4	-	1.4	0.20	-	-	<.0001
		2,2	E D C	1	24.37	D C	1.8	49.8	-	2.4	0.20	-	-	<.0001
		2,4	B D C	1.8	24.11	C	1.4	49.7	-	1.8	0.20	-	-	<.0001
		2,6	B A C	1.2	24.02	B	1	49.3	-	2.2	0.20	-	-	<.0001
		2,8	B A	1.6	23.95	B A	1.6	49.2	-	1.6	0.20	-	-	0.0063
	3,0	A	1.4	23.84	A	1.2	49.1	-	2	0.20	-	-	0.1345	
	B	1,0	D E	3	17.85	E D	3	48.2833	-	3	0.19	-	-	-
		1,2	D E F	2.8	17.62	E	2.8	47.7457	-	2.8	0.19	-	-	0.0453
		1,4	F	2.6	17.28	C D	2.6	47.394	-	2.6	0.18	-	-	<.0001
		1,6	E F	2.4	16.94	C B	2.4	45.5673	-	1	0.18	-	-	0.0006
		1,8	D E F	1	16.66	C B	2.2	45.1593	-	1.2	0.18	-	-	0.0011
		2,0	D E F	2.2	16.63	C B	2	45.0213	-	2.4	0.18	-	-	0.0061
		2,2	D E	2	16.57	B	1.8	44.715	-	2.2	0.18	-	-	0.0028
		2,4	D C	1.2	16.48	B	1.6	44.697	-	2	0.18	-	-	0.0151
2,6		B C	1.8	16.43	A	1.4	44.147	-	1.8	0.18	-	-	0.9536	
2,8		B A	1.6	16.30	A	1	43.68	-	1.6	0.18	-	-	0.5547	
3,0	A	1.4	16.06	A	1.2	43.0313	-	1.4	0.18	-	-	0.1814		

Quadro D-4 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede 333 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio			% de Paradas veiculares			Paradas por Veículo			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_Rd	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_Rd	AM_Rd	%Par_Rd	Par/Veh_Rd
333	A	1,0	A	1.2	74.13	A	2.4	80.2	A	1	0.39	-	-	-
		1,2	A	3	73.28	A	1.8	80.2	A	1.2	0.39	-	-	-
		1,4	A	2.4	73.27	A	2.6	80.0	A	2.4	0.38	0.4583	-	-
		1,6	A	1	73.05	A	1.6	80.0	A	3	0.38	-	-	-
		1,8	A	2.8	72.59	A	3	79.9	A	2.8	0.38	-	-	-
		2,0	A	1.8	72.17	A	2.8	79.9	A	1.6	0.38	-	-	0.0113
		2,2	A	1.6	72.11	A	2	79.5	A	1.8	0.38	-	0.3554	-
		2,4	A	1.4	71.65	A	2.2	79.4	A	2.6	0.38	0.9004	-	-
		2,6	A	2.6	71.47	A	1.2	79.0	A	2.2	0.38	-	-	-
		2,8	A	2.2	70.93	A	1	78.9	A	1.4	0.38	0.7406	-	-
	3,0	A	2	70.65	A	1.4	78.6	A	2	0.37	0.713	-	-	
	M	1,0	B D C	3	27.60	D	3	55.4	-	1	0.23	-	-	-
		1,2	D C	2.8	27.28	D	2.8	54.8	-	1.2	0.22	-	-	0.0049
		1,4	D	2.6	27.14	D	2.6	54.2	-	3	0.22	-	-	<.0001
		1,6	D C	2.4	26.82	D	2.4	53.0	-	2.8	0.22	-	-	<.0001
		1,8	D	1	26.46	D	2.2	52.1	-	1.4	0.22	-	-	<.0001
		2,0	D C	2.2	26.46	D C	2	51.6	-	1.6	0.21	-	-	<.0001
		2,2	B D C	2	26.21	D C	1	51.5	-	2.6	0.21	-	-	<.0001
		2,4	B A C	1.2	26.03	B C	1.8	51.3	-	1.8	0.21	-	-	<.0001
		2,6	B A	1.6	26.00	B A	1.6	51.3	-	2.4	0.21	-	-	<.0001
		2,8	B A	1.8	25.88	A	1.2	51.1	-	2.2	0.21	-	-	<.0001
	3,0	A	1.4	25.68	A	1.4	51.0	-	2	0.21	-	-	<.0001	
	B	1,0	E D C	3	19.19	E D	3	49.613	-	1	0.20	-	-	-
		1,2	E D	2.8	18.86	E	2.8	48.8693	-	3	0.20	-	-	0.1557
		1,4	E	2.6	18.73	C D	2.6	48.5977	-	1.2	0.20	-	-	0.0002
		1,6	E D	2.4	18.28	C D	2.4	46.66	-	2.8	0.19	-	-	0.0038
		1,8	E D	2.2	18.17	C B D	2.2	46.1583	-	2.6	0.19	-	-	0.0001
		2,0	E D	1	18.16	C B	2	46.0187	-	1.6	0.19	-	-	<.0001
		2,2	D C	2	17.95	C B	1.8	45.8017	-	2.4	0.19	-	-	<.0001
		2,4	B D C	1.2	17.88	B	1.4	45.504	-	2.2	0.19	-	-	0.0008
2,6		B A C	1.6	17.87	A	1.6	45.297	-	1.4	0.19	-	-	0.0134	
2,8		B A	1.8	17.79	A	1	44.7397	-	2	0.19	-	-	0.0372	
3,0	A	1.4	17.54	A	1.2	44.189	-	1.8	0.19	-	-	0.5216		

Quadro D-5 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 111 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio (via arterial)			% de Paradas veiculares (via arterial)			Paradas por Veiculo (via arterial)			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_P	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
111	A	1,0	-	1	48.25	A	1	38.3	A	1	0.45	-	-	-
		1,2	-	1.2	45.49	B	1.2	34.6	B	1.2	0.40	0.0025	-	-
		1,4	-	1.4	44.72	C B	3	34.0	B	3	0.40	0.0005	-	-
		1,6	-	3	44.71	C	2.8	34.0	B	2.8	0.40	<.0001	-	-
		1,8	-	2.8	44.60	C	1.4	33.7	B	1.4	0.40	<.0001	-	-
		2,0	-	2	44.19	C B	2.4	33.6	B	2.4	0.39	<.0001	-	-
		2,2	-	2.6	44.17	C B	2.2	33.4	B	2.2	0.39	<.0001	-	<.0001
		2,4	-	2.4	44.03	C B	2.6	33.3	B	2.6	0.39	<.0001	-	-
		2,6	-	2.2	43.98	C B	2	33.3	B	2	0.39	<.0001	-	-
		2,8	-	1.6	43.59	C B	1.8	32.4	B	1.8	0.38	<.0001	-	-
	3,0	-	1.8	43.57	C B	1.6	32.3	B	1.6	0.38	0.0003	-	-	
	M	1,0	-	1	7.55	-	1	11.3	-	1	0.11	-	-	-
		1,2	-	1.2	6.72	-	1.2	9.1	-	1.2	0.09	<.0001	<.0001	<.0001
		1,4	-	1.4	6.17	-	1.4	7.9	-	1.4	0.08	<.0001	<.0001	<.0001
		1,6	-	1.6	5.88	-	1.6	7.2	-	1.6	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		1,8	-	1.8	5.71	-	3	7.1	-	3	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		2,0	-	2	5.53	-	2.6	7.1	-	2.6	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		2,2	-	2.2	5.43	-	2.8	6.9	-	2.8	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		2,4	-	2.4	5.42	-	1.8	6.9	-	1.8	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		2,6	-	2.6	5.34	-	2.4	6.8	-	2.4	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
		2,8	-	3	5.27	-	2	6.8	-	2	0.07	<.0001	<.0001	<.0001
	3,0	-	2.8	5.23	-	2.2	6.6	-	2.2	0.07	<.0001	<.0001	<.0001	
	B	1,0	A	1	4.83	A	1	9.2149	-	1	0.09	-	-	-
		1,2	A	1.2	4.64	A	1.2	8.6476	-	1.2	0.09	-	-	0.0068
		1,4	B	1.4	4.10	B	1.4	7.6336	-	1.4	0.08	<.0001	-	<.0001
		1,6	B	1.6	4.10	C B	1.6	7.4963	-	1.6	0.08	-	-	<.0001
		1,8	C B	1.8	3.93	C B D	1.8	7.1506	-	1.8	0.07	-	-	<.0001
		2,0	C	2	3.83	E D	2.2	6.9487	-	2.2	0.07	<.0001	-	<.0001
		2,2	C	2.2	3.77	C E D	2	6.8867	-	2	0.07	-	-	<.0001
		2,4	C	2.4	3.70	E D	2.6	6.7849	-	2.6	0.07	-	-	<.0001
2,6		C	2.6	3.69	E D	2.4	6.7401	-	2.4	0.07	<.0001	<.0001	<.0001	
2,8		D	2.8	3.43	E D	2.8	6.587	-	3	0.07	-	-	<.0001	
3,0	D	3	3.42	E	3	6.5457	-	2.8	0.07	-	-	<.0001		

Quadro D-6 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 131 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio (via arterial)			% de Paradas veiculares (via arterial)			Paradas por Veículo (via arterial)			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_P	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
131	A	1,0	A	1	38.83	A	1	37.1	A	1	0.39	-	-	-
		1,2	A	3	37.98	B A	3	35.6	B A	3	0.38	-	-	-
		1,4	A	2.8	37.04	B	1.2	35.1	B	1.2	0.37	-	-	-
		1,6	A	1.2	36.79	B	2.2	34.8	B	2.8	0.37	-	-	-
		1,8	A	2.2	36.67	B	2.8	34.8	B	2.2	0.37	-	-	-
		2,0	A	1.6	36.54	B	2	34.5	B A	2	0.36	-	-	-
		2,2	A	2	36.39	B A	1.6	34.3	B A	2.6	0.36	-	-	-
		2,4	A	2.6	36.29	B	2.6	34.3	B	1.6	0.36	-	-	-
		2,6	A	1.8	36.26	B	1.8	34.1	B A	1.8	0.36	-	-	-
		2,8	A	1.4	36.22	B A	2.4	33.8	B A	1.4	0.35	-	-	-
	3,0	A	2.4	35.64	B A	1.4	33.7	B A	2.4	0.35	-	-	-	
	M	1,0	-	1	8.95	-	1	13.9	-	1	0.14	-	-	-
		1,2	-	1.2	8.42	-	1.2	12.1	-	1.2	0.12	0.0003	<.0001	<.0001
		1,4	-	1.4	7.94	-	1.4	10.8	-	1.4	0.11	<.0001	<.0001	<.0001
		1,6	-	1.6	7.56	-	1.6	9.6	-	1.6	0.10	<.0001	<.0001	<.0001
		1,8	-	1.8	7.30	-	1.8	9.1	-	1.8	0.09	<.0001	<.0001	<.0001
		2,0	-	2	7.04	-	2	8.6	-	2	0.09	<.0001	<.0001	<.0001
		2,2	-	2.2	6.92	-	3	8.6	-	3	0.09	<.0001	<.0001	<.0001
		2,4	-	2.4	6.92	-	2.4	8.5	-	2.4	0.09	<.0001	<.0001	<.0001
		2,6	-	2.6	6.85	-	2.2	8.4	-	2.2	0.08	<.0001	<.0001	<.0001
		2,8	-	2.8	6.77	-	2.8	8.4	-	2.6	0.08	<.0001	<.0001	<.0001
	3,0	-	3	6.68	-	2.6	8.3	-	2.8	0.08	<.0001	<.0001	<.0001	
	B	1,0	A	1	6.03	A	1	11.9455	A	1	0.12	-	-	-
		1,2	A	1.2	5.82	B	1.2	11.0957	B	1.2	0.11	-	-	-
		1,4	B	1.4	5.19	C	1.4	9.3941	C	1.4	0.09	-	-	<.0001
		1,6	B	1.6	5.11	D C	1.6	8.9525	D C	1.6	0.09	-	-	-
		1,8	C B	1.8	4.97	D E	1.8	8.5726	D E	1.8	0.09	-	-	-
		2,0	C D	2.2	4.80	E	2.2	8.1415	E	2.2	0.08	-	-	-
		2,2	C D	2	4.79	E	2	8.124	E	2	0.08	-	-	<.0001
		2,4	D	2.4	4.72	E	2.4	8.0215	E	2.4	0.08	-	-	-
2,6		E	2.6	4.39	F	3	7.3363	F	3	0.07	-	<.0001	<.0001	
2,8		E	2.8	4.35	F	2.6	7.3199	F	2.6	0.07	-	-	-	
3,0	E	3	4.31	F	2.8	7.2907	F	2.8	0.07	-	-	-		

Quadro D-7 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 313 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio (via arterial)			% de Paradas veiculares (via arterial)			Paradas por Veículo (via arterial)			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_P	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
313	A	1,0	A	1	44.45	A	1	39.4	A	1	0.42	-	-	-
		1,2	B A	2.8	41.04	B	1.2	36.3	B	2.8	0.38	-	-	-
		1,4	B	1.2	40.80	B	2.8	36.2	B	1.2	0.38	-	-	-
		1,6	B	3	40.29	B	3	36.0	B	3	0.38	-	-	-
		1,8	B	2.6	39.58	B	2.6	35.7	B	2.6	0.37	-	-	-
		2,0	B	2.4	39.46	B	2.4	35.5	B	2.4	0.37	-	-	-
		2,2	B	1.4	38.96	B	2.2	35.0	B	2.2	0.37	-	-	-
		2,4	B A	1.6	38.77	B	1.4	34.9	B	2	0.37	-	-	-
		2,6	B A	2	38.68	B	2	34.9	B	1.4	0.37	-	-	-
		2,8	B A	2.2	38.66	B	1.8	34.7	B	1.6	0.37	-	-	-
	3,0	B A	1.8	38.35	B	1.6	34.6	B	1.8	0.36	-	-	-	
	M	1,0	-	1	9.56	A	1	15.6	-	1	0.16	-	-	-
		1,2	-	1.2	8.94	B	1.2	13.6	-	1.2	0.14	0.0001	-	<.0001
		1,4	-	1.4	8.36	C	1.4	12.1	-	1.4	0.12	0.0001	-	<.0001
		1,6	-	1.6	8.05	D	1.6	10.9	-	1.6	0.11	<.0001	-	<.0001
		1,8	-	1.8	7.80	E D	1.8	10.3	-	1.8	0.10	<.0001	-	<.0001
		2,0	-	2	7.60	E F	2	9.8	-	2	0.10	<.0001	-	<.0001
		2,2	-	2.2	7.47	E F	2.2	9.5	-	2.2	0.10	<.0001	-	<.0001
		2,4	-	2.4	7.34	E F	3	9.5	-	3	0.10	<.0001	-	<.0001
		2,6	-	2.6	7.33	F	2.6	9.3	-	2.6	0.09	<.0001	-	<.0001
		2,8	-	3	7.30	F	2.8	9.3	-	2.8	0.09	0.0001	-	<.0001
	3,0	-	2.8	7.27	F	2.4	9.2	-	2.4	0.09	<.0001	-	<.0001	
	B	1,0	-	1	6.56	A	1	13.5969	A	1	0.14	-	-	-
		1,2	-	1.2	6.29	B	1.2	12.6492	B	1.2	0.13	0.0044	-	-
		1,4	-	1.4	5.57	C	1.4	10.4123	C	1.4	0.10	<.0001	-	-
		1,6	-	1.6	5.44	D C	1.6	9.9868	D C	1.6	0.10	<.0001	-	-
		1,8	-	1.8	5.34	D E	1.8	9.5277	D E	1.8	0.10	<.0001	-	-
		2,0	-	2	5.24	F E	2	9.1222	F E	2	0.09	<.0001	-	-
		2,2	-	2.2	5.12	F	2.2	8.8758	F	2.2	0.09	<.0001	-	-
		2,4	-	2.4	5.07	F	2.4	8.6344	F	2.4	0.09	<.0001	-	<.0001
2,6		-	2.8	4.69	G	2.6	7.9529	G	2.6	0.08	<.0001	-	-	
2,8		-	2.6	4.68	G	2.8	7.9115	G	2.8	0.08	<.0001	-	-	
3,0	-	3	4.58	G	3	7.8299	G	3	0.08	<.0001	-	<.0001		

Quadro D-8 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial da rede 333 para a Alternativa 1

Rede	Volume	Peso	Atraso Médio (via arterial)			% de Paradas veiculares (via arterial)			Paradas por Veículo (via arterial)			Valor de p teste Wilcoxon		
			classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	AM_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	%Par_P	classificação Tukey	Pesos em ordem decrescente	Par/Veh_P	AM_P	%Par_P	Par/Veh_P
333	A	1,0	A	1,2	32.66	A	1	35.4	A	1	0.36	-	-	-
		1,2	A	1	32.45	B A	1.2	34.7	B A	1.2	0.36	-	-	-
		1,4	A	2.4	31.73	B A	2.4	33.6	B A	2.4	0.35	-	-	-
		1,6	A	3	31.72	B A	3	33.5	B A	3	0.34	0.2388	-	-
		1,8	A	2.8	31.33	B A	2.8	33.4	B A	2.8	0.34	-	-	-
		2,0	A	1.6	31.27	B	1.6	33.3	B	1.6	0.34	-	-	-
		2,2	A	1.8	31.24	B	1.8	33.3	B A	1.8	0.34	-	-	-
		2,4	A	1.4	31.14	B A	1.4	33.1	B A	1.4	0.34	0.3747	-	-
		2,6	A	2.6	30.70	B	2.2	32.9	B A	2.2	0.34	-	-	-
	2,8	A	2.2	30.47	B A	2.6	32.9	B A	2.6	0.34	0.2816	-	-	
	3,0	A	2	30.30	B A	2	32.6	B A	2	0.33	0.3368	-	-	
	M	1,0	A	1	10.73	A	1	18.3	A	1	0.18	-	-	-
		1,2	B	1.2	10.11	B	1.2	16.3	B	1.2	0.16	-	-	-
		1,4	C	1.4	9.43	C	1.4	14.1	C	1.4	0.14	-	-	-
		1,6	D C	1.6	9.16	D	1.6	13.0	D	1.6	0.13	-	-	-
		1,8	D E	1.8	8.82	E	1.8	12.1	E D	1.8	0.12	-	-	-
		2,0	F E	2	8.64	F E	2	11.5	E F	2	0.12	-	-	-
		2,2	F E G	2.2	8.52	F	2.2	11.1	F	2.2	0.11	-	-	-
		2,4	F E G	2.4	8.42	F	2.4	10.9	F	2.4	0.11	-	-	-
		2,6	F G	2.6	8.34	F	2.6	10.9	F	2.6	0.11	<.0001	-	-
	2,8	F G	2.8	8.21	F	2.8	10.7	F	2.8	0.11	-	-	-	
	3,0	G	3	8.17	F	3	10.6	F	3	0.11	<.0001	-	-	
	B	1,0	A	1	7.42	A	1	16.031	A	1	0.16	-	-	-
		1,2	B	1.2	7.08	B	1.2	14.8264	B	1.2	0.15	-	-	-
		1,4	D C	1.6	6.61	C	1.6	12.9169	C	1.6	0.13	-	-	-
		1,6	C	1.4	6.38	C	1.4	12.2002	C	1.4	0.12	-	<.0001	<.0001
		1,8	D E	1.8	6.12	D	1.8	11.1259	D	1.8	0.11	-	-	-
		2,0	E	2	6.00	E D	2	10.6878	E D	2	0.11	-	-	-
		2,2	E	2.2	5.96	E D	2.2	10.4936	E D	2.2	0.11	-	-	-
		2,4	E	2.4	5.83	E	2.4	10.204	E	2.4	0.10	-	-	-
2,6		F	2.6	5.46	F	2.6	9.2226	F	2.6	0.09	-	-	-	
2,8	F	2.8	5.38	F	2.8	9.1591	F	2.8	0.09	-	-	-		
3,0	F	3	5.32	F	3	9.0741	F	3	0.09	-	-	-		

Quadro D-9 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a rede para a Alternativa 2

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
131	A	100	A	A	A
		125	A	A	0.8928
		150	A	A	0.7487
		175	A	A	A
		200	A	A	A
		225	A	0.9702	A
	M	100	-	E	-
		125	0.8252	D	0.0055
		150	0.0093	C	<.0001
		175	<.0001	B	<.0001
		200	<.0001	A	<.0001
		225	<.0001	A	<.0001
	B	100	D	F	F
		125	D	E	0.0021
		150	D	D	<.0001
		175	C	C	C
		200	B	B	<.0001
		225	A	A	<.0001

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
313	A	100	A	B	A
		125	A	B	A
		150	A	0.3708	A
		175	A	B A	A
		200	A	B A	0.136
		225	A	0.001	A
	M	100	-	-	-
		125	0.8598	0.7517	0.5684
		150	0.0108	<.0001	<.0001
		175	0.0002	<.0001	<.0001
		200	<.0001	<.0001	<.0001
		225	<.0001	<.0001	<.0001
	B	100	D	-	-
		125	D	0.007	0.8841
		150	D	<.0001	0.0004
		175	C	<.0001	<.0001
		200	B	<.0001	<.0001
		225	A	<.0001	<.0001

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
333	A	100	A	B	A
		125	A	B A	A
		150	0.8772	A	A
		175	0.4236	A	A
		200	A	A	A
		225	A	0.011	A
	M	100	A	B	E
		125	B	0.0368	0.0002
		150	B	C D	<.0001
		175	B	C	<.0001
		200	A	B	B
		225	A	A	0.0377
	B	100	A	E	-
		125	0.0004	E	<.0001
		150	C	D	<.0001
		175	B C	C	0.0084
		200	A	B	B
		225	A	A	0.0045

*Resultados dados em letras são relativos ao teste de Tukey que estabelece uma comparação par a par de todas as alternativas de LR testadas. Letras iguais representam grupos estatisticamente iguais.

* Resultados numéricos são os valores de p para o teste de Wilcoxon realizado entre cada alternativa de LR em relação à LR=100. Assim, se $p \leq 0,05$, então a medida de desempenho obtida com a LR em teste é estatisticamente diferente da obtida com o padrão LR=100m.

Quadro D-10 Resultados dos testes estatísticos de Tukey e Wilcoxon para verificação de igualdade para as medidas de desempenho para a via arterial para a Alternativa 2

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
131	A	100	A	A	A
		125	A	A	0.5273
		150	A	0.6274	0.7572
		175	A	A	A
		200	A	A	0.6966
		225	A	A	A
	B	100	B	E	E
		125	C	E	E
		150	C	D	D
		175	B	C	C
		200	A	B	B
		225	A	A	A
	M	100	-	-	-
		125	0.0063	0.6119	0.4667
		150	0.7517	<.0001	<.0001
		175	0.2416	<.0001	<.0001
		200	0.0042	<.0001	<.0001
		225	0.0005	<.0001	<.0001

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
313	A	100	A	A	A
		125	A	A	A
		150	A	A	A
		175	A	A	A
		200	A	A	0.0246
		225	A	A	A
	B	100	-	C	C
		125	0.0007	D	D
		150	0.0012	D	D
		175	0.9824	C	C
		200	<.0001	B	B
		225	0.0009	A	A
	M	100	-	D	E
		125	0.0063	E	0.4667
		150	0.7517	C	D
		175	0.2416	B	C
		200	0.0139	A	B
		225	0.0026	A	<.0001

Rede	Volume	LR	AM	%Paradas	Par/Veh
333	A	100	A	A	A
		125	0.3906	A	B
		150	0.3987	A	B
		175	0.1632	B	A
		200	A	A	B
		225	A	B	B
	B	100	A	A	A
		125	B	B	B
		150	C	C	C
		175	D	C	C
		200	D	C	C
		225	D	C	C
	M	100	A	A	A
		125	B	B	B
		150	C	C	C
		175	<.0001	D	D
		200	D	D	D
		225	D	<.0001	<.0001

*Resultados dados em letras são relativos ao teste de Tukey que estabelece uma comparação par a par de todas as alternativas de LR testadas. Letras iguais representam grupos estatisticamente iguais.

* Resultados numéricos são os valores de p para o teste de Wilcoxon realizado entre cada alternativa de LR em relação à LR=100. Assim, se $p \leq 0,05$, então a medida de desempenho obtida com a LR em teste é estatisticamente diferente da obtida com o padrão LR=100m.

Tabela D-1 Atraso Médio para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	52.18	38.71	48.71	26.28	48.25	26.31	43.57	28.90	1.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	53.40	37.82	40.56	27.65	38.83	27.10	35.64	29.55	2.4	-	-	-	37.85	27.28	LR-125	-	-	-
313	55.80	37.49	45.98	26.44	44.45	26.44	38.35	29.20	1.8	-	-	-	43.42	27.96	LR-200	-	-	-
333	53.81	37.47	33.31	27.06	32.45	26.93	30.30	29.55	2.0	-	-	-	30.79	29.72	LR-225	-	-	-

Tabela D-2 Atraso Médio para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	6.88	17.95	7.53	14.21	7.55	14.15	5.23	22.85	2.8	5.88	17.86	1.6	-	-	-	-	-	-
131	8.87	18.03	9.06	13.73	8.95	13.68	6.68	23.62	3.0	7.56	17.69	1.6	8.66	14.74	LR-125	-	-	-
313	9.42	18.01	9.71	13.50	9.56	13.43	7.27	22.89	2.8	8.05	17.44	1.6	9.13	16.82	LR-175	-	-	-
333	10.90	18.04	10.81	13.47	10.73	13.47	8.17	23.58	3.0	9.16	17.63	1.6	8.43	21.42	LR-225	9.21	16.77	LR-150

Tabela D-3 Atraso Médio para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	3.76	16.04	4.91	9.65	4.83	9.60	3.42	17.35	3.0	3.69	15.52	2.6	-	-	-	-	-	-
131	5.06	15.97	6.16	9.77	6.03	9.70	4.31	17.48	3.0	4.72	14.63	2.4	5.69	10.50	LR-125	-	-	-
313	5.37	15.88	6.53	9.59	6.56	9.57	4.58	17.49	3.0	5.07	14.46	2.4	5.89	11.36	LR-150	-	-	-
333	6.28	15.87	7.42	9.58	7.42	9.64	5.32	17.62	3.0	5.83	14.55	2.4	5.53	15.84	LR-225	-	-	-

Art: via arterial.

Sec: conjunto de vias secundárias.

Cooperação Fuzzy A1: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 1, ou seja, da atribuição de pesos.

Cooperação Fuzzy A2: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 2, ou seja, variação da área de avaliação do controlador *fuzzy*.

(a): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial independente dos resultados observados no conjunto de vias secundárias.

(b): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial, porém, mantendo o atraso médio do conjunto de vias secundárias menor ou igual ao obtido pelo controle fixo coordenado. É apresentado quando os resultados de atraso médio para conjunto de vias secundárias dado em Cooperação *Fuzzy* (a) for pior que o observado em “Sec” de Fixo Coordenado.

Tabela D-4 Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	32.61	78.91	38.44	76.57	38.27	76.48	32.33	79.60	1.6	33.71	78.85	1.4	-	-	-	-	-	-
131	39.97	78.38	37.64	77.85	37.07	77.51	33.69	79.77	1.4	37.07	77.51	1.0	36.84	77.79	LR-125	-	-	-
313	44.46	78.20	40.14	76.84	39.36	76.80	34.63	79.86	1.6	39.36	76.80	1.0	38.06	78.52	LR-200	-	-	-
333	47.54	78.25	35.73	77.61	35.41	77.52	32.58	80.51	2	35.41	77.52	1.0	33.18	80.74	LR-225	-	-	-

Tabela D-5 Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	13.26	67.36	11.05	58.68	11.30	58.45	6.64	68.79	2.2	6.91	66.21	1.8	-	-	-	-	-	-
131	17.56	67.73	14.07	57.87	13.91	57.47	8.31	71.07	2.6	9.07	66.44	1.8	13.91	57.47	LR-100	-	-	-
313	18.81	67.50	15.85	57.12	15.57	57.17	9.17	69.59	2.4	9.80	67.43	2.0	15.36	57.69	LR-125	-	-	-
333	21.37	67.60	18.57	57.21	18.35	57.30	10.63	72.68	3.0	11.47	67.48	2.0	12.67	68.34	LR-200	12.75	65.93	LR-175

Tabela D-6 Percentual de Paradas Veiculares para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	8.59	64.85	9.39	47.96	9.21	47.74	6.55	64.01	3.0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	11.53	64.39	12.30	48.53	11.95	48.16	7.29	63.54	2.8	-	-	-	11.92	50.35	LR-125	-	-	-
313	12.37	64.11	13.52	47.85	13.60	48.05	7.83	64.13	3.0	7.91	63.12	2.8	12.45	50.29	LR-125	-	-	-
333	14.15	64.27	15.95	47.81	16.03	48.00	9.07	64.55	3.0	9.16	63.09	2.8	11.11	57.00	LR-175	-	-	-

Art: via arterial.

Sec: conjunto de vias secundárias.

Cooperação Fuzzy A1: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 1, ou seja, da atribuição de pesos.

Cooperação Fuzzy A2: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 2, ou seja, variação da área de avaliação do controlador *fuzzy*.

(a): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial independente dos resultados observados no conjunto de vias secundárias.

(b): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial, porém, mantendo o percentual de paradas veiculares do conjunto de vias secundárias menor ou igual ao obtido pelo controle fixo coordenado. É apresentado quando os resultados do percentual de paradas veiculares para conjunto de vias secundárias dado em Cooperação Fuzzy (a) for pior que o observado em “Sec” de Fixo Coordenado.

Tabela D-7 Paradas por Veículo para o volume veicular Alto, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	0.44	0.83	0.45	0.80	0.45	0.79	0.38	0.83	1.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	0.47	0.82	0.40	0.81	0.39	0.80	0.35	0.83	2.4	0.39	0.80	1.0	0.39	0.81	LR-125	-	-	-
313	0.51	0.82	0.43	0.80	0.42	0.80	0.36	0.83	1.8	0.42	0.80	1.0	0.40	0.82	LR-200	-	-	-
333	0.52	0.82	0.37	0.80	0.36	0.80	0.33	0.84	2.0	0.36	0.80	1.0	0.34	0.84	LR-225	0.35	0.82	LR-125

Tabela D-8 Paradas por Veículo para o volume veicular Médio, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	0.13	0.70	0.11	0.61	0.11	0.61	0.07	0.72	2.2	0.07	0.69	1.8	-	-	-	-	-	-
131	0.18	0.71	0.14	0.60	0.14	0.59	0.08	0.75	2.8	0.09	0.69	1.8	0.14	0.59	LR-100	-	-	-
313	0.19	0.71	0.16	0.59	0.16	0.59	0.09	0.73	2.4	0.10	0.70	2.0	0.15	0.60	LR-125	-	-	-
333	0.22	0.71	0.19	0.59	0.18	0.59	0.11	0.76	3.0	0.12	0.70	2.0	0.13	0.71	LR-200	-	-	-

Tabela D-9 Paradas por Veículo para o volume veicular Baixo, por tipo de controle e alternativa de cooperação *fuzzy*

Rede	Fixo Coordenado		Fuzzy		Fuzzy P=1, LR=100		Cooperação Fuzzy A1 (a)			Cooperação Fuzzy A1 (b)			Cooperação Fuzzy A2 (a)			Cooperação Fuzzy A2 (b)		
	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Art	Sec	Peso	Art	Sec	Peso	Art	Sec	LR	Art	Sec	LR
111	0.09	0.68	0.09	0.49	0.09	0.49	0.07	0.67	2.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-
131	0.12	0.68	0.12	0.50	0.12	0.49	0.07	0.67	2.8	-	-	-	0.12	0.52	LR-125	-	-	-
313	0.12	0.68	0.14	0.49	0.14	0.49	0.08	0.68	3.0	-	-	-	0.13	0.52	LR-125	-	-	-
333	0.14	0.68	0.16	0.49	0.16	0.49	0.09	0.68	3.0	-	-	-	0.11	0.60	LR-175	-	-	-

Art: via arterial.

Sec: conjunto de vias secundárias.

Cooperação Fuzzy A1: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 1, ou seja, da atribuição de pesos.

Cooperação Fuzzy A2: cooperação *fuzzy* implementada através da Alternativa 2, ou seja, variação da área de avaliação do controlador *fuzzy*.

(a): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial independente dos resultados observados no conjunto de vias secundárias.

(b): resultados obtidos para o melhor desempenho na via arterial, porém, mantendo as paradas por veículo do conjunto de vias secundárias menor ou igual ao obtido pelo controle fixo coordenado. É apresentado quando os resultados de paradas por veículos para conjunto de vias secundárias dado em Cooperação Fuzzy (a) for pior que o observado em “Sec” de Fixo Coordenado.