

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA / ELETROTÉCNICA

CRYSTIANE AYUMI KOGA
GUSTAVO VANDERLEI MASSETTE
WALTER PAULO TRAVENSOLLI

CONTROLADOR FUZZY DE SEMÁFOROS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2012

CRYSTIANE AYUMI KOGA
GUSTAVO VANDERLEI MASSETTE
WALTER PAULO TRAVENSOLLI

CONTROLADOR FUZZY DE SEMÁFOROS

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase em Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea.

CURITIBA
2012

Crystiane Ayumi Koga
Gustavo Vanderlei Massette
Walter Paulo Travensolli

Controlador Fuzzy de Semáforos

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 03 de julho de 2012.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Cristiano Quevedo Andrea, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Cristiano Quevedo Andrea, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marco José da Silva, Dr. Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Paulo Rogério da Silveira, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

Aos nossos pais, por serem responsáveis por
nossa formação.

Aos familiares e amigos, por muitos momentos
nos fazermos ausentes.

Aos amores, por todo amor e carinho despendido.

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar nosso caminho, guiar nossas escolhas e proteger nosso futuro.

Aos nossos amigos, familiares e amores por nos apoiar e aconselhar com sabedoria e paciência. Vocês nos fizeram vencer desafios e superar dificuldades nos levando a diante não importando os obstáculos a serem transpostos.

Ao professor Dr. Cristiano Quevedo Andrea, por nos acolher como seus orientandos, apoiando e direcionando a construção deste trabalho. Agradecemos também por seu entusiasmo enquanto professor ao transferir parte do seu conhecimento contribuindo de forma decisiva na nossa formação acadêmica e em nossa formação de caráter.

Ao professor Mestre Paulo Rogério da Silveira a quem honrosamente chamamos de co-orientador, por tão prontamente nos direcionar e aconselhar facilitando nosso entendimento sobre assuntos até então complexos.

Ao Engenheiro Julio César Secolo Ganacim, por nos auxiliar no entendimento e no desafio de operacionalizar a simulação e o controlador Fuzzy de maneira sábia e prática.

À Secretaria Municipal de Trânsito (SETRAN) por nos receber em suas instalações e ao engenheiro Maurício Romani, por tão gentilmente esclarecer dúvidas e fornecer dados sobre o trânsito.

"Se vi mais longe foi por estar de pé sobre
ombros de gigantes."

Isaac Newton

RESUMO

KOGA, Crystiane A.; MASSETE, Gustavo V.; TRAVENSOLLI, Walter P. Controlador Fuzzy de Semáforos. 2012. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

O aumento de carros em circulação tem sido um dos principais problemas no trânsito das grandes cidades. Curitiba, por exemplo, traz diversos cruzamentos que apresentam formação de congestionamentos, sendo escolhido o encontro entre a Avenida Presidente Getúlio Vargas e Rua Brigadeiro Franco para estudo. O grau de incerteza do trânsito possibilita o uso de Lógicas não convencionais, sendo a Lógica Fuzzy um dos principais modelos aplicáveis para tal situação. Dentre as diversas aplicabilidades da Lógica Fuzzy, o controle de semáforos tem apresentado bons resultados. O controle de semáforos apresenta-se, frente a problemática exposta, como uma solução economicamente viável e que proporciona resultados rapidamente mensuráveis. Para conhecimento do tema, Lógica Fuzzy, estudos e revisão dos modelos existentes foram realizados. Nota-se, através destes, que a viabilidade desta aplicação necessita de um modelo de simulação baseado em características reais de tráfego. Sendo assim, um cruzamento foi estudado, coletando-se informações referentes à quantidade de carros que fluem pelo semáforo utilizando os sentidos permitidos, sendo considerados ciclos (tempo) em que este se encontra aberto. A simulação do controlador de semáforos, o tráfego e coleta gráfica dos resultados foram realizados via *software* MATLAB. Para a verificação do controlador optou-se por uma comparação ao semáforo simples e através dos resultados desta comparação pode-se comprovar que a utilização da Lógica Fuzzy em semáforos é eficaz e traz bons resultados.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy, Controlador Fuzzy, Controlador de semáforos.

ABSTRACT

KOGA, Crystiane A.; MASSETE, Gustavo V.; TRAVENSOLLI, Walter P. Fuzzy Controller of Traffic light. 2012. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso Superior de Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

The increase in cars on the road has been a major problem in traffic in big cities. Curitiba, for example, has several intersections that have traffic jams, among these was chosen the intersection between the Presidente Getúlio Vargas Avenue and Brigadier Franco Street for study. The uncertainty of transit enables the use of unconventional Logic, and as one of these the Fuzzy Logic is one of the main models applicable to this situation. Among the diverse applicability of fuzzy logic, control of traffic lights has shown good results. The control lights presents, against the problem exposed, as a solution economically viable and which provides results quickly measured. For knowledge of the subject, Fuzzy Logic, study and review of existing models were performed. It is clear, by means of these, that the feasibility of this application requires a simulation model based on real traffic characteristics. Thus, an intersection was studied by collecting information regarding the amount of vehicles flowing through the traffic light by the senses allowed, being considered cycles (time) in which it is open. The simulation of the traffic light controller, traffic and collection of graphical results were performed via software MATLAB. To check the controller was decided to compared it to a simple traffic light and through the results of this comparison can be proved that the use of fuzzy logic in traffic light is effective and brings good results.

Keywords: Fuzzy Logic, Fuzzy controller, Traffic light controller.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Vista aérea do cruzamento Av. Pres. Getúlio Vargas x R. Brigadeiro Franco.	15
Figura 2 - Gráfico de função triangular.....	21
Figura 3 - Gráfico de função trapezoidal.	22
Figura 4 - Estrutura básica de um Controlador Fuzzy.	23
Figura 5 - Metrô de Sendai com Controlador Fuzzy.	27
Figura 6 - Cruzamento Avenida Presidente Getúlio Vargas x Rua	30
Figura 7 - Entradas do Controlador Fuzzy.	31
Figura 8 - Entradas do Temporizador.	32
Figura 9 - Posicionamento das Entradas do Controlador Fuzzy	33
Figura 10 - Posicionamento das Entradas do Temporizador.....	34
Figura 11 - Chave Comparadora.....	35
Figura 12 - Interface da Base de Regras.	35
Figura 13 - Combinação de Controladores.....	36
Figura 14 - Superfície de Controle.	37
Figura 15 - Comportamento de trânsito método centróide.	38
Figura 16 - Comportamento de trânsito método bissetor.....	39
Figura 17 - Inter-relação Trânsito e Controlador.....	41
Figura 18 - Simulação Semáforo de rotinas fixas.....	42
Figura 19 - Simulação Semáforo de rotinas fixas.....	43
Figura 20 - Tráfego Real para Semáforo de Rotinas Fixas.	45
Figura 21 - Tráfego Real para Semáforo Fuzzy.	46
Figura 22 - Modulação de Tempo Fuzzy.	47
Figura 23 - Classe 1.	55
Figura 24 - Simulação de veículos que passam pelo semáforo.	57
Figura 25 - Saída de Automóveis.	59
Figura 26 - Tráfego.....	60
Figura 27 - Sistema de Aleatoriedade.	61
Figura 28 - Processamento do Primeiro Sinal Aleatório.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico de Fluxo por SETRAN - 2011	15
Tabela 2 - Entradas e saídas de Carros no Semáforo de rotinas fixas.	45
Tabela 3 - Entradas e saídas de Carros no Semáforo Fuzzy.	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	TEMA	13
1.1.1	Delimitação do Tema.....	13
1.2	PROBLEMA	13
1.3	OBJETIVOS.....	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos.....	16
1.4	JUSTIFICATIVA	17
1.5	MÉTODO DE PESQUISA	17
2	LÓGICA FUZZY	19
2.1	CONJUNTOS FUZZY	19
2.1.1	Funções de Pertinência.....	21
2.1.2	Proposições Fuzzy	22
2.2	CONTROLADORES FUZZY	23
2.2.1	Base Conhecimento	23
2.2.2	Fuzzificação.....	24
2.2.3	Inferência.....	25
2.2.4	Defuzzificação	26
2.2.5	Funcionamento do controlador.....	26
2.3	APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY	27
3	DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY DE SEMÁFOROS ..	28
3.1	BASE DE DADOS	28
3.1.1	Número de entradas	29
3.1.2	Funções de pertinência.....	30
3.1.3	Os valores máximos e mínimos das entradas.....	32
3.1.4	Modelo de função de pertinência utilizado	33
3.1.5	Posicionamento das funções de pertinência	33
3.1.6	Caracterização da saída	34
3.2	BASE DE REGRAS	35
3.3	FUZZIFICAÇÃO	37
3.4	INFERÊNCIA	37

3.5	DEFUZZIFICAÇÃO	37
4	MODELO DE SIMULAÇÃO.....	40
4.1	SEMÁFORO FUZZY	40
4.2	SEMÁFORO DE ROTINAS FIXAS.....	42
5	RESULTADOS	44
6	CONCLUSÃO.....	49
7	REFERÊNCIAS.....	51
	APÊNDICE A - Núcleo de trânsito	54

1 INTRODUÇÃO

A formação de congestionamento em grandes cidades vem se tornando um evento cada vez mais recorrente, principalmente em países em desenvolvimento como é o caso do Brasil.

Nota-se que estes congestionamentos são consequência de dois principais fatores: o crescimento acelerado da frota de veículos situados em grandes cidades e a carência de investimentos em infraestrutura de transporte.

Frente a essa questão, diversas possibilidades podem ser exploradas, como por exemplo, o rodízio de carros que foi adotado na cidade de São Paulo. Destaca-se que todas as ações que apresentam um intuito claro de aperfeiçoar o sistema de trânsito apresentam pontos positivos e pontos negativos, os quais derivam de uma relação entre três esferas: custo, efetividade e tempo.

Uma saída promissora que já se encontra em funcionamento no Brasil e em outros países é o aperfeiçoamento do controle dos semáforos. Um bom controle de semáforos pode gerar bons resultados a baixos custos, no entanto, ressalta-se que esse não poderá solucionar o problema vivenciado nas grandes cidades como um todo, podendo surtir como resultado apenas a redução do problema.

O controle semaforístico apresenta um interesse em adequar os tempos para os quais as vias encontram-se liberadas para fluxo às necessidades de trânsito. Sua operacionalização pode contar com diversas variáveis como o fluxo de carros, quantidade de veículos que chegam à entrada, veículos que fluem pelo semáforo, condições meteorológicas, entre outros.

Com o intuito de controlar o sistema de trânsito adequadamente deve-se primordialmente selecionar a Lógica que seja compatível as principais características do sistema. Analisando-se este, nota-se que uma das principais características é a incerteza. Como conseguinte destaca-se que a Lógica Fuzzy apresenta-se adequada a questão por trabalhar a incerteza através da imprecisão.

Diversos controladores de semáforos imbuídos da Lógica Fuzzy foram desenvolvidos em estudos anteriores a este, destacando-se alguns trabalhos: Pappis e Mamdani (1977), Kim (1994, *apud* Niittymäki, 1998), Niittymäki e Pursula (2000), entre outros. Entretanto, este controle pode ser operacionalizado de diversas formas sendo empregado para tanto análises e critérios diferentes variando seu modelo de sensoriamento sua relação de causas e efeitos (base de conhecimento) entre outras características intrínsecas ao controlador.

Propõe-se averiguar se um controlador que utilize ambas as questões na tomada de decisão, urgência e capacidade do sistema, apresentaria resultados promissores no controle do tráfego. Acredita-se que, para tanto, três variáveis de entrada sejam perfeitamente suficientes para exercer um controle: quantidade de carros antes do semáforo, quantidade de carros após o semáforo e controle de tempo de funcionamento.

1.1 TEMA

Determinados problemas apresentam uma solução ótima quando a percepção humana e sua lógica não convencional são empregadas. Esta percepção se manifesta através da inteligência artificial, tendo a Lógica Fuzzy como um de seus principais modelos construtivos. Tal metodologia estabelece que determinadas análises são tomadas de maneira subjetiva e necessitam para seu correto entendimento de parâmetros de comparação ou balizamento. A Lógica Fuzzy pode ser aplicada na tomada de decisões, sendo um alvo interessante para estudos, como sua aplicação no metrô de Sendai.

1.1.1 Delimitação do Tema

A versatilidade da implementação da Lógica Fuzzy permite a construção de diversos modelos de controladores (ANDRADE; JACQUES, p. 1-2). Propõe-se utilizar a Lógica Fuzzy aplicada a semáforos. Nota-se ainda, que há a possibilidade de se fazer um controle baseado em características diversas de trânsito. Todavia, considerar todos os parâmetros possíveis de trânsitos em grandes cidades inviabilizaria os estudos dos resultados, bem como da análise de efetividade do controlador. Para tanto será adotado um modelo de cruzamento simples, ou seja, o encontro entre duas vias.

1.2 PROBLEMA

O congestionamento apresenta-se como um dos grandes problemas a serem tratados no trânsito das grandes cidades. O número de carros em circulação vem aumentando por diversos fatores, destacando o crescimento econômico das classes “C” e “D” e o aumento do crédito para financiamento de automóveis.

Na cidade de Curitiba esta situação apresenta-se cada vez mais nítida. Segundo o anuário publicado pelo Detran (2010) constata-se que o crescimento da frota de carros de 2009 a 2010 era de aproximadamente 7,65%. Analisando os valores de automóveis aos dados populacionais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) do ano de 2010 faz com que Curitiba seja uma das capitais com o maior número de carros por habitante, aproximadamente 0,68 carros por pessoa.

Dentro da capital Paranaense podem-se constatar diversos cruzamentos nos quais há a formação de congestionamentos. Para o presente estudo foi escolhido o encontro entre a Avenida Presidente Getúlio Vargas e Rua Brigadeiro Franco, seguindo critérios de facilidade de acesso pelos membros do grupo e existência de congestionamentos frequentemente. Destaca-se que diariamente uma grande quantidade de carros flui por este cruzamento, aproximadamente 51.500 segundo dados coletados do SETRAN (2011), justificando sua relevância para a região e para o presente estudo.

As principais características destas avenidas são:

- Em média, a Avenida Presidente Getúlio Vargas apresenta um fluxo de veículos maior que a Rua Brigadeiro Franco;
- Ambas as vias possuem três faixas e mão única;
- O fluxo de automóveis é mais intenso no período após as 12h00min e antes das 14h00min e logo após o fim do expediente comercial (característica comum a diversas regiões da cidade).

O cruzamento em questão é ilustrado na Figura 1.



Figura 1 - Vista aérea do cruzamento Av. Pres. Getúlio Vargas x R. Brigadeiro Franco.
Fonte: Google Maps (2012).

Este cruzamento apresenta semáforos que trabalham com rotinas fixas que se alternam de acordo com os horários do dia. As características deste foram devidamente estudadas através de levantamentos de dados do órgão competente pelo seu monitoramento (SETRAN) e através de análise de campo. Este estudo levou aos dados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Histórico de Fluxo por SETRAN - 2011

Início	Término	Quantia de Carros		Fluxo de carros / Seg	
		Get. Vargas	Brig. Franco	Get. Vargas	Brig. Franco
00:00	02:00	625	282	0,19	0,09
02:00	04:00	230	88	0,07	0,03
04:00	06:00	280	95	0,09	0,03
06:00	08:00	2998	1894	0,79	0,50
08:00	10:00	4086	2793	1,06	0,73
10:00	12:00	3502	2451	0,92	0,65
12:00	14:00	3747	2754	1,01	0,74
14:00	16:00	3760	2399	1,01	0,64
16:00	18:00	4209	2631	1,13	0,71
18:00	20:00	3984	2366	1,07	0,64
20:00	22:00	2417	1427	0,72	0,42
22:00	00:00	1553	957	0,45	0,28

Fonte: SETRAN (2011).

Nota-se pelos dados apresentado que o horário crítico para este cruzamento está compreendido entre as 16h00min às 18h00min, momento este que apresenta maior quantidade de carros transitando pelo semáforo.

1.3 OBJETIVOS

Para uma correta aplicação do modelo ao problema descrito é necessário o estabelecimento de metas. Estas podem ser resumidas a um objetivo principal que se desdobra em objetivos mais específicos.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo principal é verificar a eficiência de um semáforo controlado por meio da ação de controle baseada em Lógica Fuzzy.

1.3.2 Objetivos Específicos

Do objetivo geral, e após a realização de uma revisão bibliográfica desdobram-se as seguintes metas a serem atingidas:

1. Levantar características típicas de tráfego em cruzamento de estudo;
2. Coletar dados de trânsito;
3. Construir modelo de simulação;
4. Simular controlador Fuzzy e controlador de rotinas fixas com dados reais de trânsito;
5. Analisar e comparar resultados obtidos com a simulação do controlador Fuzzy e o semáforo de rotinas fixas;
6. Concluir o estudo.

1.4 JUSTIFICATIVA

Diversas alternativas podem ser consideradas para se minimizar o congestionamento em grandes cidades, como: transportes coletivos (metrô), pedágio urbano¹, retirada dos estacionamentos do centro da cidade, novas vias, mudança de hábitos dos motoristas e alargamento das ruas. Destaca-se que as possibilidades podem vir a apresentar um entrave quanto ao custo ou quanto ao tempo para bom funcionamento (o metrô, por exemplo, exige longo tempo para construção e grandes investimentos e utilização de sistemas de rodízio de placas, entre outros necessitam de fiscalização e mudança de cultura dos motoristas para se tornarem efetivas).

O controle eficaz de semáforos apresenta-se como uma das soluções economicamente viáveis e com grandes perspectivas de apresentar resultados no curto prazo. Devido as características do sistema trânsito, das quais destaca-se a incerteza, a Lógica Fuzzy é indicada para exercer o controle sobre o semáforo, pois esta opera sistemas incertos através da imprecisão. Ou seja, as características do trânsito impossibilitam a formulação de equações para exercer o controle do semáforo. No entanto, a utilização de um sistema matemático que seja fundamentado em regras e utilize a aproximação para inserir os dados de entrada ao modelo de cálculo, o que caracteriza a Lógica Fuzzy, mostra-se ideal.

Logo, justifica-se o emprego da Lógica Fuzzy pelo comportamento incerto das variáveis de entrada e como consequência do sistema como um todo.

1.5 MÉTODO DE PESQUISA

Para atingir o objetivo proposto, verificar a aplicação do sistema de semáforos controlados pela Lógica Fuzzy, sugere-se que sejam seguidas as seguintes etapas:

Etapas 1 – Desenvolver um modelo de controlador de semáforos que possa controlar o trânsito do cruzamento escolhido. Para tanto, listar as possíveis entradas do controlador Fuzzy

¹ Pedágio Urbano – Solução que começou a ser utilizada em Londres, idealizada por Derek Turner, que consistem em cobrar uma taxa as pessoas que utilizem carros para acessar certas áreas dos centros das grandes cidades.

e selecionar aquelas que se mostrarem suficientes para controlar o trânsito de maneira satisfatória;

Etapa 2 – Realizar estudo do comportamento do trânsito no local de estudo (Av. Getúlio Vargas e Rua Brigadeiro Franco) através de observação e em horários no qual seja notada a tendência de formação de filas;

Etapa 3 – Transcrever o comportamento observado em informações a serem inseridas no de simulação MATLAB para compor a base de dados;

Etapa 4 – Criar um modelo de regras que apresente uma quantidade de regras aceitável e que seja capaz de exercer um comportamento gradativo (pouco abrupto). Avaliar a quantidade de curvas de pertinência de cada entrada e a associação das entradas.

Etapa 5 – Simular o controlador Fuzzy através do *software* MATLAB levando em consideração os dados coletados e a base de regras utilizada nas etapas anteriores. Inserir na simulação estrutura que possibilitem a contagem da quantidade de carros que flui pelo cruzamento por ciclo, bem como a duração de cada ciclo (tempo em segundo);

Etapa 6 – Realizar o ajuste fino do controlador, alterando as características iniciais como o modelo de defuzzificação e valores de máximo e mínimo de cada entrada, a fim de avaliar os resultados das alterações, comparar visualmente os gráficos gerados em ambos os casos e também os dados de entrada e saída dos cruzamentos para cada situação;

Etapa 7 – Construir modelo de simulação de rotinas fixas capaz de emular o trânsito observado. Para tanto, levantar duração de ciclos com órgão responsável pelo controle do semáforo, inserir dados coletados através de observação (etapa 2), adaptar estrutura de simulação no *software* MATLAB.

Etapa 8 – Comparar gráfico de formação de filas resultante da simulação realizada com controlador de rotinas fixas e controlador Fuzzy. A comparação será visual e realizada através de gráficos. Através da comparação, tecer análise sobre a eficácia do controlador proposto.

2 LÓGICA FUZZY

A Lógica Fuzzy aplicada a controladores exige, para seu correto emprego, o entendimento de três principais esferas.

Primeiramente, o conceito da Lógica fuzzy e suas principais características, destacando-se: suas definições e as regras que regem este modelo matemático. Neste âmbito há de ser ressaltada a importância dos conjuntos Fuzzy, teoria que fundamenta a Lógica Fuzzy.

Após um entendimento dos conceitos é de suma importância entender que esta será aplicada a um controlador para a formulação de um circuito de controle. Para tanto será apresentado um modelo genérico de controlador, bem como seu funcionamento.

Por fim, serão apresentadas algumas das aplicações da Lógica Fuzzy, as quais dão credibilidade a continuação dos estudos deste modelo como controle e incitam a continuidade de seu estudo com o intuito de ampliar seu campo de atuação.

2.1 CONJUNTOS FUZZY

A segmentação de objetos de estudo entre classes pode ou não ser realizada através de uma análise *Booleana*. Para alguns casos é possível utilizar lógicas aritméticas simples para os quais o nível lógico baixo configura a negação ao passo que o nível lógico alto representa a conformidade. No entanto, para certos tipos de análises os valores lógicos: alto e baixo, por si só, não podem compor uma imagem completa da realidade, sendo necessária uma gradação entre estes níveis.

Ainda para realizar esta segmentação pode-se empregar denominações que serão associadas a grandezas matemáticas pertencentes ao contínuo compreendido entre zero e um. Por exemplo, ao analisar-se a beleza de um objeto simplesmente, classificá-lo como bonito ou feio não pode ser considerado o bastante, pois não permite a devida comparação entre este e outro objeto, ou até mesmo saber o quão bonito este é. Portanto, indica-se a utilização de características subjetivas como: muito bonito, bonito, normal, entre outros.

A gradação supracitada associada à subjetividade compõe os fundamentos dos Conjuntos Fuzzy, enunciados inicialmente pelo professor Lotfi Zadeh (1965), segundo Zadeh (1965, p. 338):

“... Um conjunto Fuzzy é uma classe de objetos com um contínuo de graus de pertinência. Tal conjunto é caracterizado por funções de pertinência (características), que atribuem a cada objeto um grau de adesão ao conjunto que varia entre zero e um. As noções de inclusão, união, interseção, complementar, relação, convexidade, etc., são estendidas aos referidos conjuntos, e várias propriedades destas noções são estabelecidas no contexto de conjuntos Fuzzy. Em particular, um teorema de separação de conjuntos Fuzzy convergentes é provado sem a necessidade de que os conjuntos Fuzzy sejam disjuntos.”

A teoria clássica de conjuntos apregoa que, dado um universo U e um conjunto A , os elementos desse universo pertencem ou não ao conjunto. Logo, a função característica do conjunto A pode ser expresso por:

$$F_A = \begin{cases} 1 & \text{se } u \in A \\ 0 & \text{se } u \notin A. \end{cases} \quad (1)$$

Em um caso preciso, o fator de pertinência assume valor 1 para elementos pertencentes a A e 0 para não pertencentes.

Zadeh (1965) apresentou uma caracterização estendida da função, introduzindo a ideia de que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. Desta forma o fator de pertinência pode assumir um número infinito de valores no intervalo $[0,1]$, sendo que os valores 0 e 1 indicam completa exclusão ou completa pertinência respectivamente. Um conjunto Fuzzy A contido em um universo U é definido por uma função de pertinência μ_A que apresenta valores no intervalo $[0,1]$:

$$\mu_A(u): U \rightarrow [0,1]. \quad (2)$$

O conjunto A é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(u)/u\}, u \in U, \quad (3)$$

onde $\mu_A(u)$ indica o quanto o elemento u é pertinente ao conjunto A , posto que um elemento pode pertencer a mais de um conjunto com diferentes graus de pertinência.

É chamado de conjunto suporte de um conjunto Fuzzy A , o conjunto dos elementos no universo U tal que $\mu_A(u) > 0$.

Um conjunto Fuzzy cujo suporte é um único elemento, ou seja, $\mu_A(u) = 1$, é considerado conjunto unitário Fuzzy ou *singleton*. Desta forma o conjunto Fuzzy pode ser percebido como o mapeamento do conjunto suporte no intervalo $[0,1]$, o que implica representar o conjunto Fuzzy através de sua função de pertinência.

2.1.1 Funções de Pertinência

As funções de pertinência definem os Conjuntos Fuzzy, sendo responsáveis ainda pelo formato e suporte dos mesmos.

A função de pertinência é, essencialmente, uma curva distribuída com graus de pertinência que melhor representam as propriedades semânticas de uma palavra ou expressão linguística. Tais funções podem assumir qualquer formato, mas não se pode esquecer que tal representação deve traduzir o resultado mais fiel possível da realidade do fenômeno físico modelado e como tal, deve ser sintonizado empiricamente (SILVEIRA, 2004, p. 21).

As formas das funções de pertinência podem variar dependendo do que se deseja representar e do contexto de aplicação. Estas funções podem ser definidas a partir da experiência e da perspectiva do usuário, porém é comum empregar funções padrão, como: as de forma triangular, trapezoidal, gaussiana e sino. A seguir são descritas as formas triangular e trapezoidal de função de pertinência.

- Triangular - função definida por três parâmetros, que determinam as coordenadas x dos três vértices. Esta função é visualizada na Figura 2.

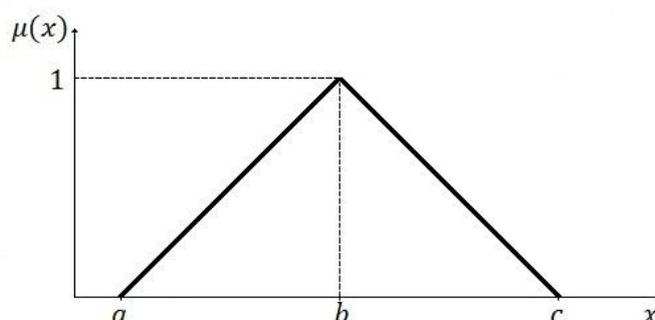


Figura 2 - Gráfico de função triangular.
Fonte: Adaptado de Martins (2007).

- Trapezoidal - função definida por quatro parâmetros, como apresentado a seguir. A função trapezoidal é ilustrada na Figura 3.

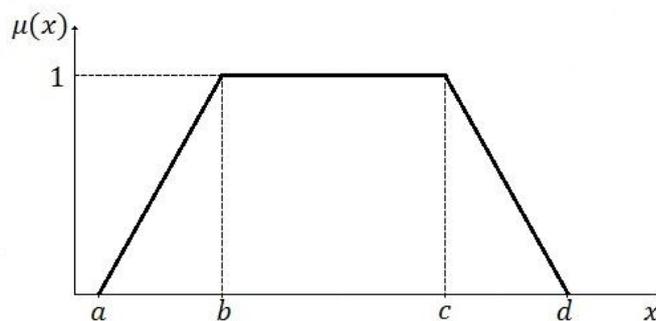


Figura 3 - Gráfico de função trapezoidal.
Fonte: Adaptado de Martins (2007).

2.1.2 Proposições Fuzzy

Proposições Fuzzy podem ser combinadas através de diferentes operadores como os conectivos lógicos *e* e *ou*, a negação *não* e também o operador de implicação *se...então*, gerando assim novas proposições Fuzzy que podem ser descritas em termos de relações Fuzzy.

De maneira geral, o conectivo *ou* é aplicado a variáveis que se encontram no mesmo universo, enquanto que o conectivo *e* é empregado com variáveis de universos diferentes. O conectivo *ou*, quando usado em variáveis de sentenças do tipo *se...então*, pode ser usado com duas variáveis diferentes. A operação *não* é sinônima da negação em linguagem natural.

O operador *se...então* é chamado declaração condicional Fuzzy e descreve a dependência do valor de uma variável linguística em relação ao valor de outra. Em diversas aplicações essas sentenças condicionais são empregadas em frases do tipo *se t é A então u é B*.

Em caso de haver mais de uma variável antecedente (*t é A*) na declaração condicional, estas são normalmente combinadas pelo conectivo *e*.

O conectivo *ou* também pode ser usado para combinar mais de uma declaração:

$$R^1: \text{se } t \text{ é } A^1 \text{ então } u \text{ é } B^1 \text{ ou}$$

$$R^2: \text{se } t \text{ é } A^2 \text{ então } u \text{ é } B^2 \text{ ou}$$

$$\vdots$$

$$R^n: \text{se } t \text{ é } A^n \text{ então } u \text{ é } B^n.$$

2.2 CONTROLADORES FUZZY

O uso da Lógica Fuzzy em controladores de semáforos teve seu início com o trabalho realizado em 1977 por Pappis e Mamdani e desde então vários outros pesquisadores deram continuidade aos trabalhos desenvolvendo diferentes tipos de controladores semafóricos.

A motivação para esta nova abordagem veio de casos onde o conhecimento especialista de controle era disponível, seja por meio de operadores ou de projetistas, e os modelos matemáticos envolvidos eram muito custosos, ou muito complicados para serem desenvolvidos (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHKEIT, 1995, p. 15).

O controlador semafórico Fuzzy atua de forma automática de acordo com o monitoramento do tráfego. Está presente neste controlador características específicas, ou seja, sua estrutura é composta por elementos como: base de conhecimento, interface de fuzzificação, inferência e interface de defuzzificação.

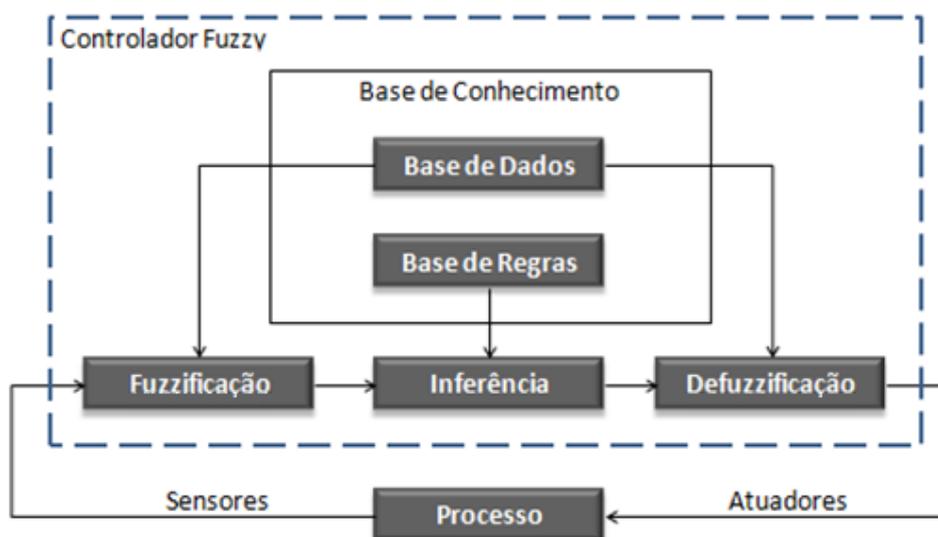


Figura 4 - Estrutura básica de um Controlador Fuzzy.
 Fonte: Adaptado Sandri e Correia (1999).

A seguir cada uma das estruturas básicas, apresentadas na Figura 4, será devidamente descritas para o entendimento do controlador baseado na lógica Fuzzy.

2.2.1 Base Conhecimento

A base de conhecimento é a modelagem do sistema a ser controlado. É composta por uma base de dados e uma base de regras linguísticas. A base de dados contém as definições numéricas que dão suporte as funções de pertinência usadas no conjunto de regras Fuzzy.

A base de regras caracteriza os objetivos de controle e a estratégia de controle utilizada por especialistas na área, por meio de um conjunto de regras de controle, em geral, lingüísticas (Shaw e Simões, 1999).

A forma mais generalizada de uma regra lingüística pode ser representada por:

Se <premissa> **então** <consequência>

As premissas também chamadas de antecedentes são associadas com as entradas do Controlador Fuzzy, e formam a parte das regras representada à esquerda, enquanto as conseqüências, que também são conhecidas como ações, estão associadas às saídas dos controladores (Driankov; Hellendoorn e Reinfrank, 1996) e (Ross, 1995).

A criação da superfície de controle é muito importante para se analisar o controlador. Esta superfície é sustentada pela base de regras e através dela pode-se visualizar como o controlador se comportará diante das situações previstas nas regras, além de ser possível fazer análise de trajetória de controle, verificar se não há descontinuidades no sistema, checar a estabilidade, entre outras propriedades e características do sistema de controle desenvolvido.

Em suma, a superfície de controle ilustra as variáveis de entrada e suas correspondentes variáveis de saída, ou seja, a função de controle do processo.

2.2.2 Fuzzificação

O processo de fuzzificação consiste em associar ou calcular valores para representar variáveis de entrada. Estes valores são condicionados ao universo de discurso e representam um grau de pertinência da entrada em um ou mais conjuntos Fuzzy. Em outras palavras, fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (em geral discreto) para o domínio Fuzzy (Shaw e Simões, 1999).

Portanto, é nessa etapa que as variáveis de entrada, expressos em valores numéricos, são transformados em graus de pertinência e associados a uma variável lingüística, possibilitando assim a interpretação do Controlador Fuzzy.

2.2.3 Inferência

O processo de inferência representa a racionalização do processador após adquirir os dados de entrada e antes deste disponibilizar ao sistema os dados de saída. Ou seja, após a fuzzificação o controlador é responsável por interpretar os dados de entrada transformando-os em variáveis que possam ser entendidas pelo controlador (variáveis Fuzzy). Este, de acordo com o modelo matemático pré-estabelecido pelo seu programador, irá analisar os dados e repassar uma sentença Fuzzy resultante. O modelo matemático supracitado baseia-se nas regras definidas no sistema para avaliar os dados de entrada. A sentença será, então, defuzzyficada gerando o dado de saída. Estes conceitos são igualmente apresentados conforme a seguir:

“O procedimento de inferência processa os dados Fuzzy de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de controle Fuzzy, aplicando o operador de implicação Fuzzy e as regras de inferência da Lógica Fuzzy. A interface de defuzzyficação transforma as ações de controle inferidas em ações de controle não-Fuzzy” (GOMIDE; GUDWIN; TANSCHHEIT, 1995, p. 15).

Os principais modelos de inferência adotados em controladores Fuzzy, segundo Sandri e Correa (1999, p. 6) são os modelos clássicos, de Mamdani e Larsen e os modelos de interpolação, de Takagi-Sugeno e o Tsukamoto.

Cabe ressaltar que estes modelos seguem uma lógica comum de procedimentos para análise matemática. Esta pode ser subdividida nos seguintes passos:

1. Verificação de compatibilidade e as cláusulas nas premissas das regras;
2. Determinação da compatibilidade global da premissa de cada regra;
3. Determinação dos valores de conclusão, em função do grau de compatibilidade com os dados de ação de controle constante na conclusão;
4. Agregação dos valores obtidos como conclusão nas várias regras, obtendo-se uma ação de controle global.

Segundo Sandri e Correa (1999, p. 6) a escolha do método depende do comportamento desejado do sistema. Os modelos diferem-se pela maneira em que as premissas são apresentadas, pela representação das ações de controle e quais operadores são utilizados para implementação do controlador.

2.2.4 Defuzzificação

A defuzzificação é uma operação que converte um conjunto Fuzzy de saída de um sistema em um valor preciso. Assim a defuzzificação é uma transformação inversa que traduz a saída do domínio Fuzzy para o domínio discreto (Shaw e Simões, 1999).

Há vários métodos para a defuzzificação que devem ser escolhidos de acordo com o sistema utilizado. Os principais são: máximo, centro de área ou centroide, bissetor, média dos máximos e centro dos máximos. A seguir é apresentado o conceito de dois destes:

- **Bissetor** - Esse método consiste em determinar uma secção que segregue a região de resposta em duas sub-regiões de igual área.
- **Centro de Área ou Centróide** - Esse método calcula o centro de gravidade do conjunto de áreas composta pelas regras de inferência. Um ponto negativo para este método é o esforço computacional envolvido para o cálculo do valor exato.

2.2.5 Funcionamento do controlador

Após o entendimento individual de todas as estruturas que compõe o modelo de controle apresentado na Figura 3, há de ser descrito o funcionamento do controlador com um sistema.

Neste, a estrutura da Fuzzyficação basicamente traduz dados sensorizados dos sistemas em informações Fuzzy, as quais podem ser analisadas na etapa de inferência. Para tanto, os dados coletados são analisados de acordo com as regras estipuladas na base de conhecimentos. O resultado do controlador é obtido após a análise matemática realizada para a aderência de cada regra, gerando uma resposta do controlador. Esta resposta será novamente, transformada em valores que podem ser interpretados por sistemas convencionais no processo da defuzzificação, fechando o sistema de controle Fuzzy.

Destaca-se ainda que segundo a estrutura configuração de controle apresentada a atuação do controle influi nas variáveis do sistema, os quais serão sensorizados e repassados ao controlador, caracterizando um sistema retroalimentado.

2.3 APLICAÇÃO DE LÓGICA FUZZY

A substituição de algumas tarefas do homem por máquinas inteligentes, não apenas em tarefas físicas, mas também em tarefas que exigem raciocínio lógico não é um anseio recente. As ligações entre lógica e matemática criaram a possibilidade de realização de simples cálculos matemáticos por máquinas, dando avanço tecnológico, criando e aprimorando máquinas industriais, eletrodomésticos, computadores, setor automobilístico.

A Lógica Fuzzy desempenha funções como controle, configuração, ajuste, tornando possível maior economia de energia e melhor controle e configuração de equipamentos beneficiando diversas áreas da tecnologia.

Entre 1970 e 1980 as aplicações industriais da Lógica "Fuzzy" aconteceram com maior importância na Europa e após 1980, o Japão iniciou seu uso com aplicações na indústria. Algumas das primeiras aplicações foram em um tratamento de água feito pela Fuji Electric em 1983 e pela Hitachi em um sistema de metrô inaugurado em 1987. Por volta de 1990 é que a Lógica "Fuzzy" despertou um maior interesse em empresas dos Estados Unidos (ABBAR, 2004).

Um exemplo da aplicação da Lógica Fuzzy é o metrô de Sendai. Sua velocidade, a aceleração e a frenagem são controladas sem a supervisão humana. Para garantia da segurança e conforto dos passageiros o sistema prima pelo menor tempo de deslocamento entre duas estações e melhor forma para o consumo de energia modelando passa isso a velocidade do metrô.



Figura 5 - Metrô de Sendai com Controlador Fuzzy.
Fonte: Sendai Subway (2011).

3 DESENVOLVIMENTO DO CONTROLADOR FUZZY DE SEMÁFOROS

A confecção do controlador de semáforos seguirá a estrutura genérica de controladores proposta anteriormente, Figura 4, a qual é composta por: base de dados, base de regras, inferência, fuzzyficação e defuzzificação. O desenvolvimento destas serão apresentadas a seguir:

3.1 BASE DE DADOS

Para a construção da base de dados do controlador semaforico deve-se analisar seis principais questões, são elas:

1. Determinar a quantidade de entradas;
2. Determinar a quantidade de funções de pertinência para cada entrada;
3. Determinar os valores máximos e mínimos das entradas;
4. Determinar o modelo de função de pertinência utilizado;
5. Determinar os valores máximos, mínimos e médios para cada função de pertinência;
6. Determinar a caracterização da saída.

Ressalta-se que a construção do controlador foi conduzida partindo-se de valores iniciais empíricos, e através da avaliação de resultados de simulações foram escolhidos os valores que conduzem o controlador a resultados considerados adequados.

A metodologia empregada apresenta foco no resultado, ou seja, o valor que é considerado o ótimo representa aquele em que a quantia de carros que atravessam o semáforo para um dado intervalo de tempo é máximo.

O horário de funcionamento escolhido representa um dos momentos em que há maior movimentação de veículos, das 12h00min às 13h00min. Para este nota-se um fluxo de veículos de 1,01 carros para a Avenida Presidente Getúlio Vargas e um fluxo de 0,74 carros para a Rua Brigadeiro Franco.

3.1.1 Número de entradas

Para que o número de entradas fosse obtido, foram estudadas as diversas variáveis do sistema em análise definindo-se o número mínimo capaz de levar a atuação do controlador aos resultados esperados. Este estudo conduziu a conclusão de que através de cinco entradas é possível controlar o semáforo de maneira adequada. A inserção de outras variáveis como datas do ano, hora do dia e clima poderiam conduzir o controlador a melhores resultados através da predição de eventos. No entanto, essa ação implicaria a uma complexidade de análise não desejada, sendo, portanto, descartada deste estudo, mas indicada a trabalhos posteriores.

Por questões de simplicidade as ruas selecionadas para estudo serão tratadas como Rua A e Rua B, sendo essas referidas a Rua Brigadeiro Franco e Avenida Presidente Getúlio Vargas respectivamente. Logo, as entradas escolhidas para o controlador são:

1. Entrada da Rua A - representando a quantia de carros compreendidos entre o semáforo controlado por Fuzzy e o semáforo anterior na Rua A;
2. Entrada da Rua B - representando a quantia de carros compreendidos entre o semáforo controlado por Fuzzy e o semáforo anterior na Rua B;
3. Saída da Rua A - representando a quantia de carros compreendidos entre o semáforo controlado por Fuzzy e o semáforo posterior na Rua A;
4. Saída da Rua B - representando a quantia de carros compreendidos entre o semáforo controlado por Fuzzy e o semáforo posterior na Rua A;
5. Temporizador - fornece duas informações: a rua que está liberada para fluir o trânsito e também o tempo que tal ação perdura. Destaca-se a importância desta entrada para que uma situação em que somente um sentido seja privilegiado não ocorra.

O Cruzamento é representado na Figura 6.

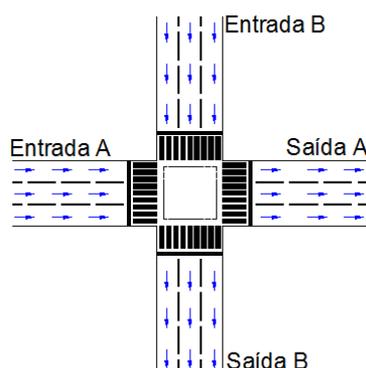


Figura 6 - Cruzamento Avenida Presidente Getúlio Vargas x Rua Brigadeiro Franco
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012)

3.1.2 Funções de pertinência

A partir da quantificação do número de entradas devem-se definir os detalhes de cada entrada. Para tanto, a primeira questão a ser analisada é a quantia de funções de pertinência que cada entrada deve conter. Cabe dizer que quanto maior o número de funções de pertinência mais suave será o controle exercido. No entanto, há duas implicações negativas em se utilizar muitas funções de pertinência: um maior número de regras de controle e uma incompatibilidade com a sensibilidade humana.

A resposta ótima obtida para esse conflito de escolhas foi utilizar cinco funções de pertinência para cada entrada que computasse a quantia de carros, segregadas da seguinte maneira:

1. Muito baixo;
2. Baixo;
3. Mediano;
4. Alto;
5. Muito Alto.

Utilizando-se as rotinas de simulações Fuzzy no MATLAB, pode-se visualizar a inserção destas entradas no controlador Fuzzy na Figura 7.

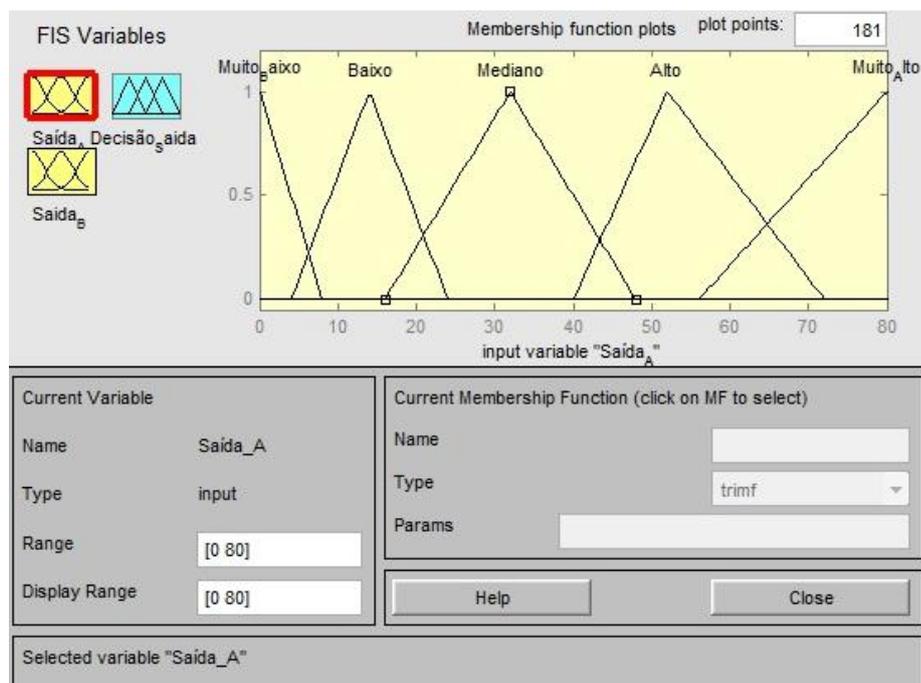


Figura 7 - Entradas do Controlador Fuzzy.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Já o temporizador é composto de seis funções de pertinência, sendo três delas positivas e três delas negativas. Foram empregados dados positivos e negativos para distinguir tempos em que o sinal encontra-se aberto para cada uma das vias (sentido B liberado correlaciona-se aos valores negativos e sentido A liberado aos positivos). Por se tratar de variáveis que se repetem os três modelos estabelecidas serão apresentados na sequência:

1. Tempo grande - representa uma longa permanência em tal estado, devendo ser trocado independente das considerações das demais entradas;
2. Tempo médio - A curva mediana representa a atuação do controlador na qual há menor influência da variável tempo, sendo o momento em que as demais variáveis de entrada são determinantes para a resposta.
3. Tempo baixo - representa um intervalo de tempo curto para dada entrada devendo ser mantida sua preferência de acordo com as considerações das entradas;

De maneira análoga ao apresentado para as entradas de carros, pode-se visualizar a inserção da entrada do temporizador no *software* MATLAB através da Figura 8.

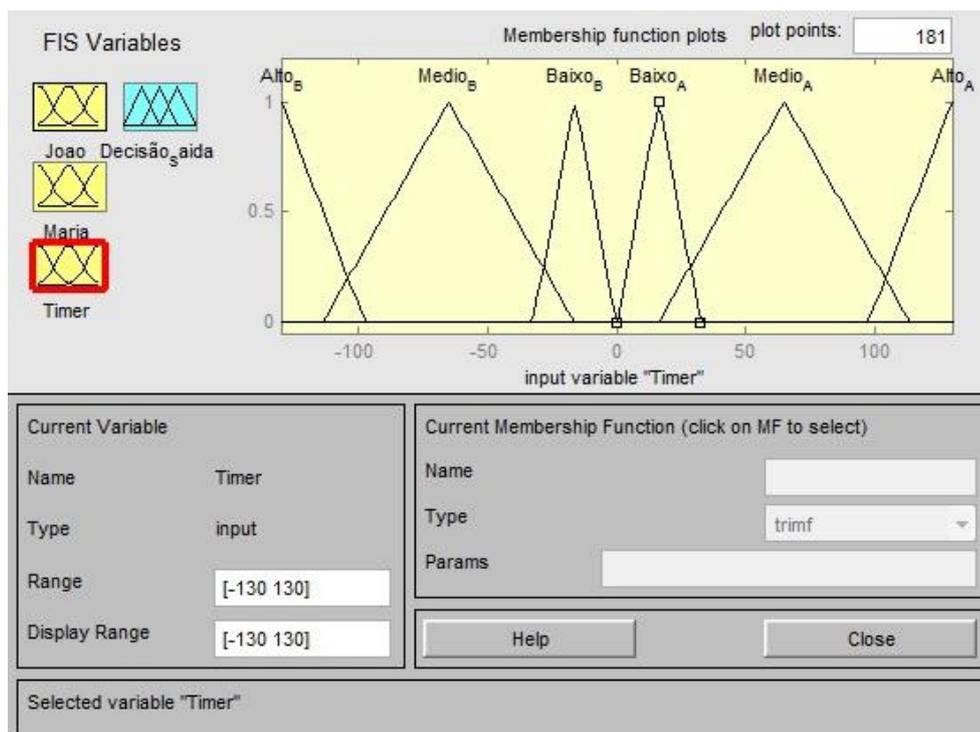


Figura 8 - Entradas do Temporizador.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

3.1.3 Os valores máximos e mínimos das entradas

Para definição dos valores máximos e mínimos de cada entrada foi contabilizado a quantidade de carros, a capacidade de automóveis que uma quadra comporta, número de faixas, comprimento da quadra, tamanho médio de carros e distância entre dois veículos considerando a localidade proposta, Avenida Presidente Getúlio Vargas e Rua Brigadeiro Franco. Além do cálculo foi feito um estudo em campo para avaliar a veracidade das informações projetadas. Por fim constatou-se que, em média, cada quadra pode comportar no máximo 80. O valor mínimo de carros utilizados é 0.

Destaca-se que se um evento em que o valor máximo seja ultrapassado não implica em resultados inesperados ou negativos para o controlador Fuzzy, sendo que a consideração de adesão a função de pertinência terá como resultado a máxima projetada.

Nota-se que este valor não apresentará simulações para a definição de um ponto ótimo, pois foi estabelecido empiricamente e comprovado em campo.

Foi estabelecido que o temporizador atuasse com tempo máximo e alternância de estado. Este valor máximo foi inicialmente estipulado pelo grupo como sendo igual a 80

segundos. Todavia, após as simulações de calibragem foi constatado que se deve utilizar o tempo máximo igual a 130 segundos.

3.1.4 Modelo de função de pertinência utilizado

Realizada as considerações de valores máximos e mínimos das entradas do controlador e, também, a quantidade de funções de pertinência - bem como seu significado - há de serem analisados os tipos/modelos de funções que serão empregados. Não existe um conceito para se determinar este modelo, sendo utilizado o modelo que se assemelha mais ao entendimento do especialista. Por fim, o modelo de curva empregado para as cinco entradas, é o triangular. Para a saída uma composição de modelo triangular e trapezoidal. A utilização desta composição se justifica pelo fato de que a saída é uma tomada de decisão, logo não deve haver gradientes de adesão e o uso de uma curva triangular serve para cobrir a região de transição entre as decisões.

3.1.5 Posicionamento das funções de pertinência

Os valores que caracterizam as funções pertinência são: mínimo, máximo e médio, foi determinado por meio de simulações e comparação de resultados. Os valores para os quais se constatou os melhores resultados são apresentados na Figura 9.

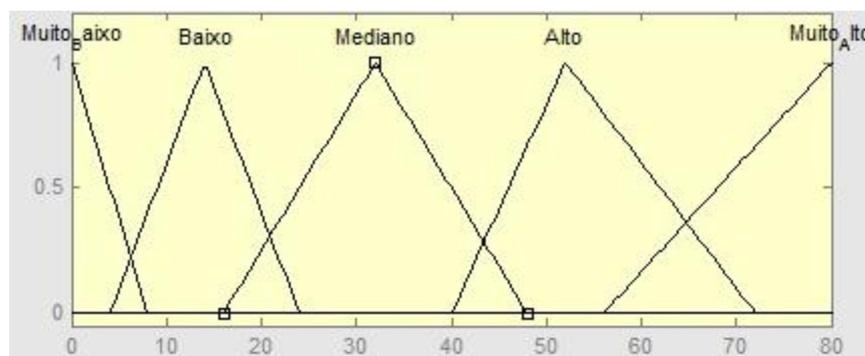


Figura 9 - Posicionamento das Entradas do Controlador Fuzzy
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

O melhor posicionamento das curvas do temporizador encontrados são apresentados na Figura 10.

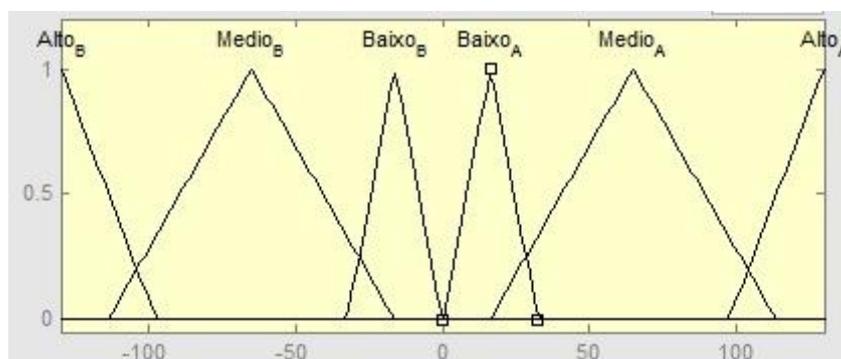


Figura 10 - Posicionamento das Entradas do Temporizador.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

3.1.6 Caracterização da saída

A atuação do controlador proposto no trânsito é a troca ou não do estado do semáforo. Para viabilizar a conexão do controle Fuzzy com o restante da simulação, foi utilizada uma chave comparadora. Esta chave filtra valores que poderiam ser interpretadas pelo sistema como meias decisões. E para facilitar a tomada de decisão, curvas trapezoidais foram empregadas. Juntamente com estas, uma curva triangular foi utilizada para representar uma indeterminação. Nota-se que as regras e o modelo controle exigiram a existência da curva triangular de indeterminação, pois os dados comparados eram conflitantes dificultando uma análise não tendenciosa do grupo. Todavia, através de alterações de regras e alterações no modelo de controle pode suprimir a necessidade da existência da chave comparadora, tomando-se a decisão simplesmente pelo controle e suas funções de pertinência.

A seguir destaca-se na Figura 11 a chave comparadora.

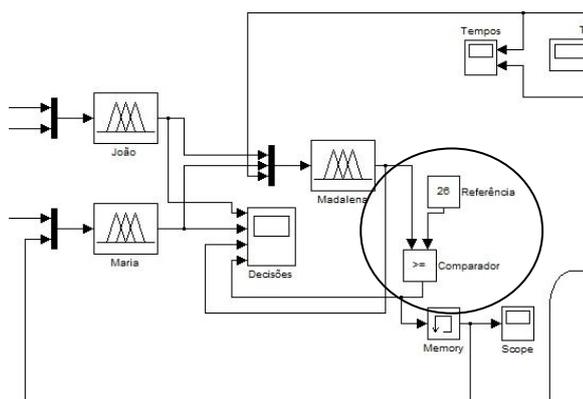


Figura 11 - Chave Comparadora
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

3.2 BASE DE REGRAS

A base de regras do controlador Fuzzy semafórico foi construída utilizando-se MATLAB, conforme apresentado na Figura 12.

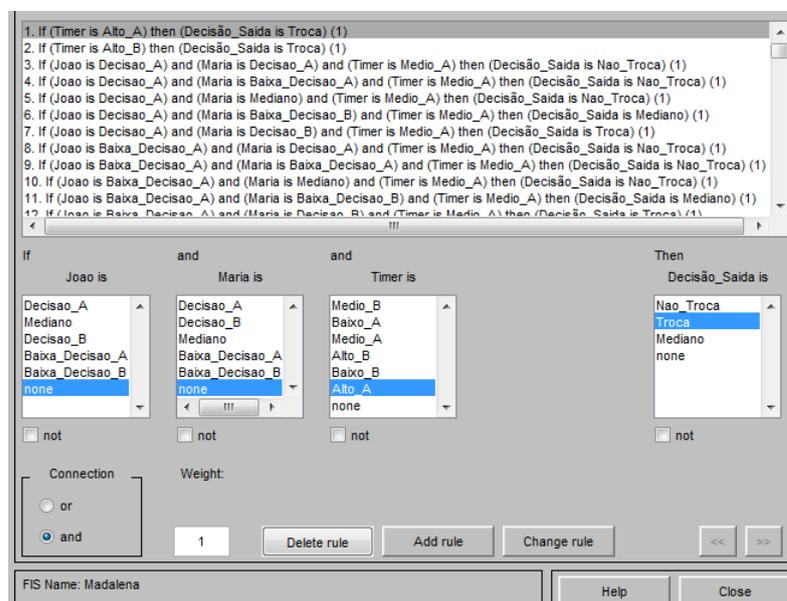


Figura 12 - Interface da Base de Regras.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Deve-se destacar, no entanto, que se utilizando as cinco funções de pertinência, apresentados anteriormente (Muito baixo; Baixo; Mediano; Alto; Muito Alto), o montante de regras a ser estabelecido superaria 3700 regras, tornando o controlador demasiado complexo e pesado para simulações.

Frente a este problema adotou-se a solução de separar as análises do controlador em três instancias. A primeira análise denota a prioridade quanto à entrada. A segunda determina a prioridade quanto à saída. Em uma última instância, as respostas dos dois conjuntos Fuzzy apresentados são utilizados como entrada em conjunto com a variável temporizador resultando em uma resposta final do controlador. Esta situação é representada na Figura 13.

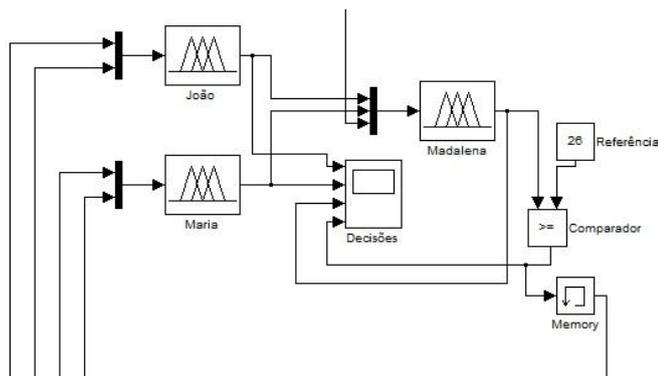


Figura 13 - Combinação de Controladores.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

As regras de controle e seu efeito podem ser visualizadas através de superfícies tridimensionais. Para o controlador em questão, as superfícies de entradas e saídas de automóveis (“João e Maria”) são similares entre si e sua leitura/conclusão pode ser facilmente auferida. Os eixos destas superfícies são: saída/entra A, saída/entrada B e decisão saída/entrada. Cada curva carrega os valores máximos e mínimos das entradas e saídas do controlador utilizadas, no caso variando de 0 a 80. Constata-se que a superfície é simétrica demonstrando que as considerações que são feitas para dada rua são igualmente utilizadas para a outra. A decisão para cada evento é obtida cruzando-se os valores de entrada, e obtendo-se a saída do sistema.

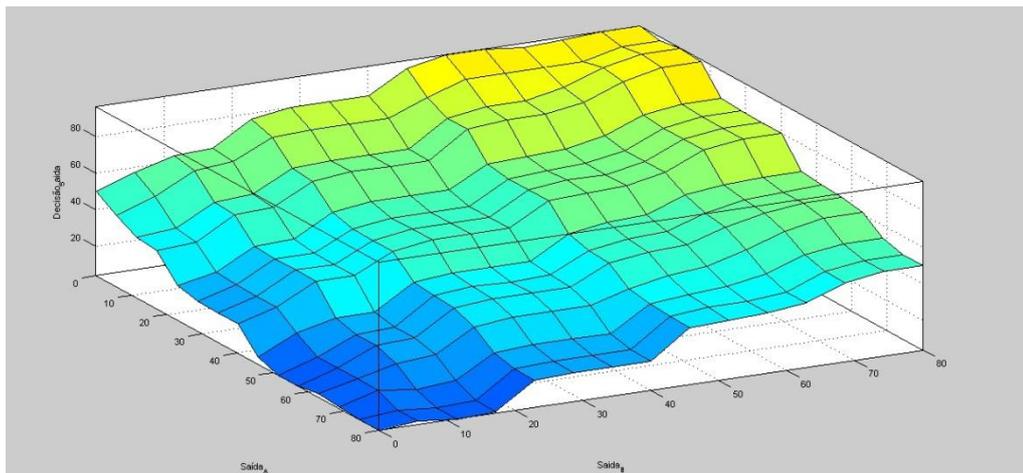


Figura 14 - Superfície de Controle.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

3.3 FUZZIFICAÇÃO

Conforme dito anteriormente a Fuzzyficação consiste na tradução dos valores sensorizados em valores Fuzzy. Este processo é automatizado pelo *software* MATLAB (2012), sendo necessárias tão somente as definições da base conhecimento, a qual foi detalhada anteriormente.

3.4 INFERÊNCIA

Para o controle de semáforos a inferência será realizada pelo método de Mamdani. Esta escolha se deu pela utilização deste mesmo método em estudos consagrados da aplicação da Lógica Fuzzy em controladores de trânsito, como o realizado por Papis e Mamdani em 1977.

3.5 DEFUZZIFICAÇÃO

A determinação do método de defuzzificação impacta diretamente no resultado obtido pelo controlador. Segundo o site do *software* MATLAB (2012), o modelo centróide geralmente apresenta bons resultados, sendo escolhido, portanto, como o modelo de partida.

No entanto, todos os métodos disponíveis no MATLAB foram simulados (Centróide, Bissetor, Média dos máximos, menor dos máximos, e maior dos máximos), sendo que o método bissetor e centróide foram os que demonstraram os melhores resultados.

O resultado da simulação em que se utilizou o método centróide é apresentado na Figura 15, sendo que nesta o primeiro gráfico de dados corresponde ao conjunto de carros situados antes do semáforo da Rua A, o segundo corresponde ao conjunto de carros na saída da mesma rua. O terceiro e quarto gráficos referem-se a dados da Rua B, sendo análoga a Rua A.

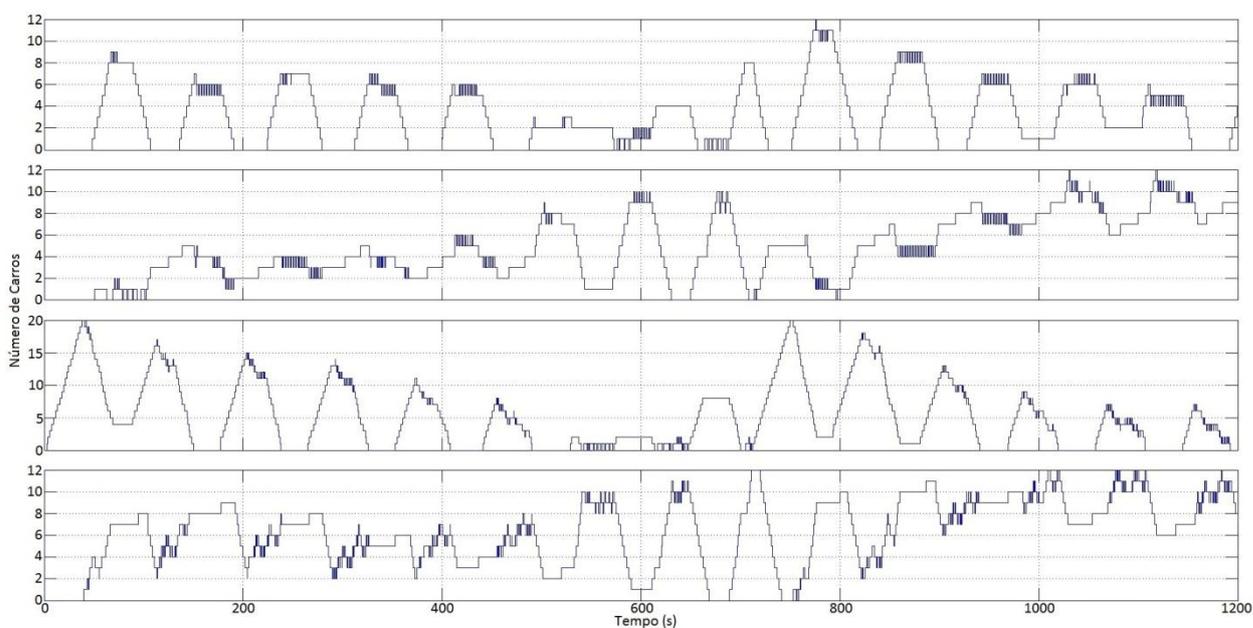


Figura 15 - Comportamento de trânsito método centróide.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Já para o método bissetor o gráfico obtido é apresentado na Figura 16.

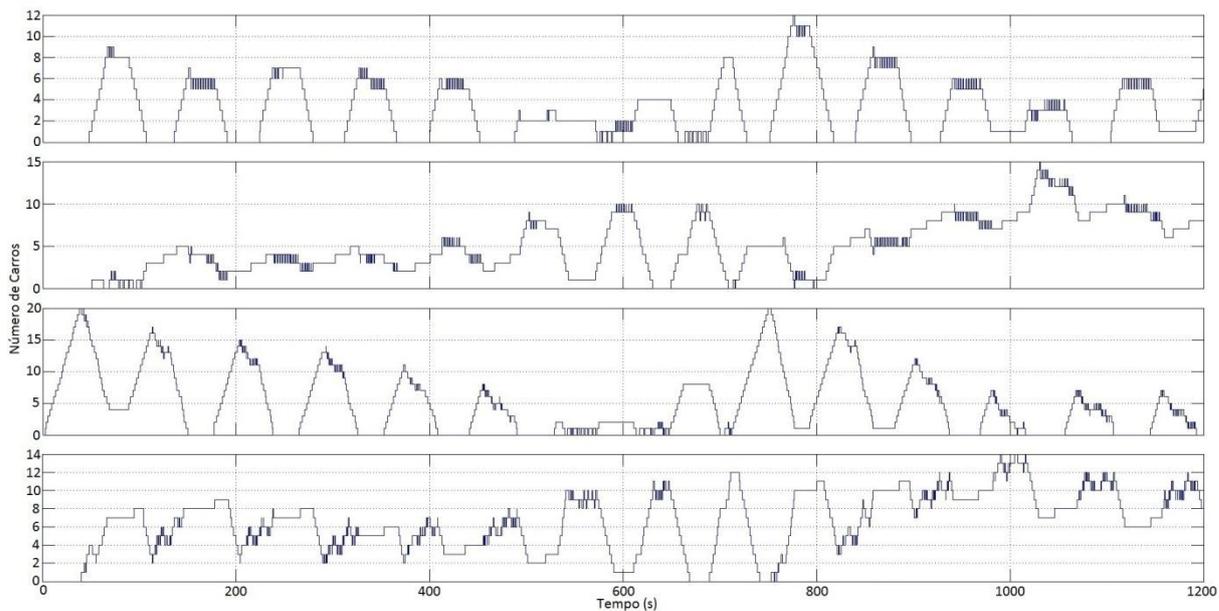


Figura 16 - Comportamento de trânsito método bissetor.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Nota-se, pela análise dos gráficos que ambos os métodos apresentam respostas similares no controle de trânsito, justificando o emprego de ambos para estudo. No entanto, a análise dos resultados do método bissetor resulta em curvas de maior constância, destacando-se principalmente a saída da Rua B para os instantes finais da simulação, sendo assim este será o método empregado no controlador.

4 MODELO DE SIMULAÇÃO

A análise da aplicabilidade da Lógica Fuzzy para o problema selecionado, congestionamento de trânsito, é viabilizada por uma simulação confiável e flexível, capaz de adaptar testes de melhoria no controlador que o conduzam a sua melhor eficiência. Essa deve possibilitar a comparação do trânsito quando utilizado um sistema simples e temporal ao controle proposto por lógica Nebulosa.

Para tanto foi estudado a utilização de dois programas: o *software* de cálculo MATLAB e o *software* de simulações estatísticas Arena Simulation. Todavia, optou-se por desenvolver o controlador Fuzzy em apenas um destes, o MATLAB. Essa decisão foi tomada por duas principais razões: familiaridade com o programa e o fato de este possuir biblioteca específica para controladores Fuzzy. O ambiente utilizado para simular o controlador dentro do MATLAB é o Simulink. No entanto, cabe destacar, que a utilização do *software* Arena Simulation apresenta-se promissora sendo uma indicação para estudos posteriores, bem como a utilização da linguagem de programação dentro do MATLAB.

Visando a verificação da eficiência do controlador Fuzzy, optou-se por uma comparação entre um semáforo simples e um controlado através da Lógica Fuzzy. Para se obter os resultados que possibilitam a comparação entre os dois modelos, optou-se por construir simulações de funcionamento utilizando, para ambos os modelos semafóricos, dados de entrada similares.

4.1 SEMÁFORO FUZZY

O modelo desenvolvido para dar suporte à simulação do semáforo controlado pela Lógica Fuzzy é composto, além do controlador Fuzzy por outros quatro macros estruturas, que são: temporizador, interface semafórica, núcleo de trânsito e chave seletora.

A inter-relação entre as etapas fundamentais da simulação pode ser visualizada na Figura 4. Quanto a esta, destaca-se que o controlador Fuzzy utiliza como uma de suas informações do temporizador. A atuação do controlador Fuzzy é realizada através da interação entre as funções de pertinência e a chave seletora. A saída deste sistema: controlador Fuzzy/chave seletora influencia diretamente a interface semafórica. Esta interface

correlaciona-se diretamente com o núcleo de trânsito. Por fim, a contagem de carros tanto de saída como em espera são dados de entrada para o controlador, perfazendo assim o sistema de simulação desenvolvido.

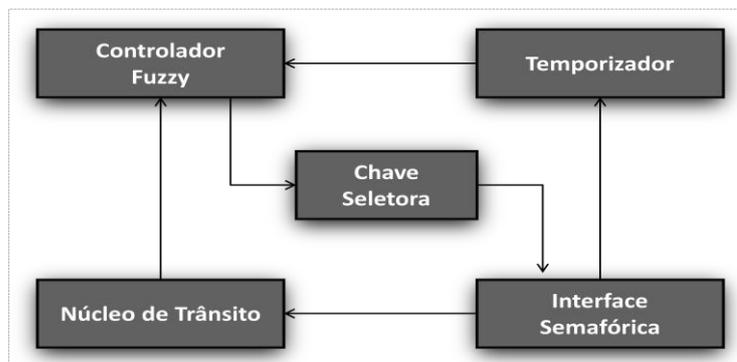


Figura 17 - Inter-relação Trânsito e Controlador.
Fonte: Aatoria Própria (2012).

O temporizador tem duas funções na montagem, que são: fornecer a informação de qual semáforo está em estado verde, bem como o tempo de permanência do mesmo neste estado. Para tanto é necessário que este receba um sinal da interface semafórica. Este sinal marca o início da contagem de tempo bem como o sinal da contagem, ou seja, contagem positiva para estado verde na rua A e contagem negativa para estado verde na rua B.

A chave seletora tem a função de interpretar a resposta do controlador e atuar na interface semafórica. A utilização da chave se justifica pelo fato de que a resposta do controlador é um valor numérico e que a interface semafórica deve responder a uma decisão de trocar ou não de estado. Logo a chave seletora atua de forma a transformar o valor numérico recebido do controlador em uma decisão. Para tanto é escolhido um valor de corte, baseado na escala de valores das funções de pertinência de saída do controlador. Este valor é tomado como a referência da chave. Desta forma, as respostas do controlador que tiverem valor superior ao de referência serão interpretadas como uma decisão de troca enquanto que valores inferiores representarão uma decisão de não trocar.

A interface semafórica é a parte do semáforo que age sobre o trânsito, ou seja, é esta parte que permite ou não a passagem de veículos através de seus estados verde (passar), amarelo (atenção) e vermelho (parar). A alteração entre os estados ativos depende diretamente da chave seletora.

O núcleo de trânsito é responsável por representar em simulação o comportamento do fluxo de trânsito frente à atuação do semáforo (interface semafórica). As características de fluxo e comportamento que serão utilizados em simulação foram construídas baseadas em observação e coleta de informações em cruzamento real. Tais características podem ser modificadas de uma simulação a outra se necessário. Por se tratar de uma parte complexa da simulação, porém muito importante para os resultados e conclusões sobre o controlador, optou-se por discorrer detalhadamente sobre o assunto no Apêndice A.

A seguir, na Figura 18, são mostradas todas as estruturas que compõe a simulação do controlador Fuzzy em ambiente do MATLAB, o Simulink.

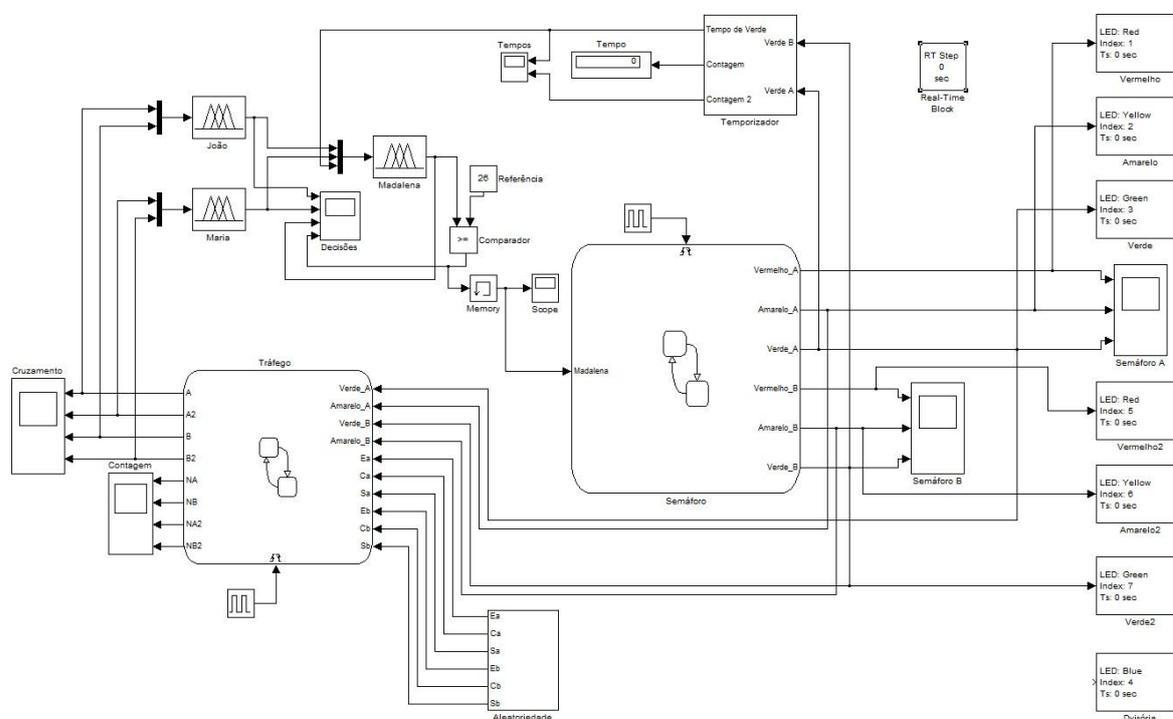


Figura 18 - Simulação Semáforo de rotinas fixas.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

4.2 SEMÁFORO DE ROTINAS FIXAS

O semáforo de rotinas fixas é apenas uma interface semafórica, citada anteriormente, modificada para alterar seus estados ativos em períodos de tempo fixos.

Este controlador utiliza o mesmo núcleo de trânsito utilizado no controlador Fuzzy, entretanto, por não precisar de dados de trânsito para tomar sua decisão de troca de estado ativo não é necessário que o núcleo de trânsito forneça dados de acúmulo de carros ao controlador. Sua montagem pode ser ilustrada na Figura 19.

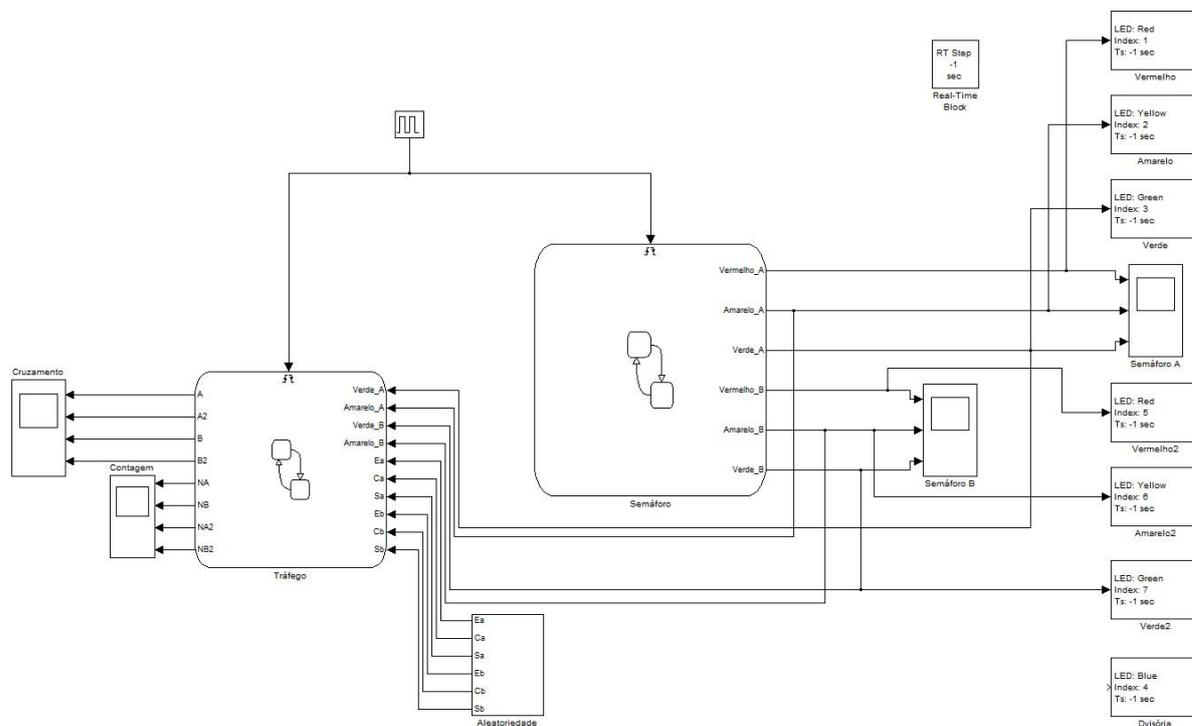


Figura 19 - Simulação Semáforo de rotinas fixas.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

5 RESULTADOS

Os resultados das simulações realizadas nos semáforos Fuzzy e simples serão apresentados a seguir. Ressalta-se que foi registrado o comportamento do tráfego em todas as quadras adjacentes aos semáforos durante todo o tempo de simulação e o número total de carros que entraram e saíram do cruzamento.

A Figura 20 ilustra o comportamento do tráfego real para o semáforo de rotina fixa e a Figura 21 o comportamento do tráfego real para o semáforo controlado por Lógica Fuzzy, ambos durante 3600 segundos (se expressa real para dados coletados em campo). O tempo de simulação foi escolhido em função do tempo de observação de cruzamento real.

Para ambas as Figuras estão contidas as seguintes curvas:

- A primeira curva ilustra o comportamento da quadra anterior ao semáforo da rua A;
- A segunda curva esta referenciada a quadra posterior ao semáforo também da rua A;
- A terceira curva ilustra a quadra anterior ao semáforo da rua B;
- A quarta curva ilustra o comportamento da quadra posterior ao semáforo também da rua B.

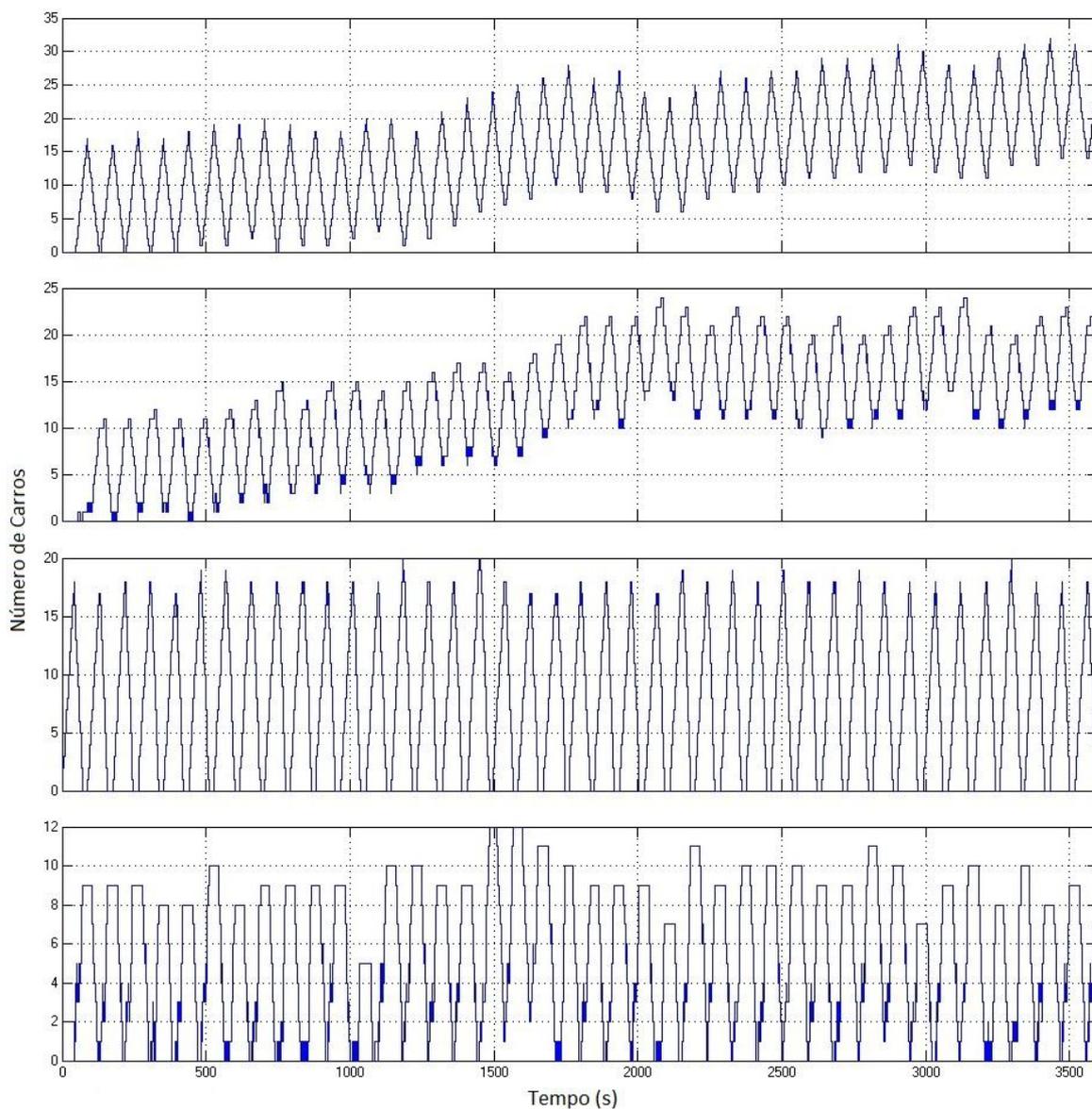


Figura 20 - Tráfego Real para Semáforo de Rotinas Fixas.
Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Nota-se que a Rua Brigadeiro Franco possui certo acúmulo de carros, que é claramente identificado por sempre haver carros na quadra antes ou após o semáforo, tendência está à formação de congestionamentos.

Para o semáforo de rotina simples o número de carros que entrou, bem como o número de veículos que saiu do cruzamento registrado ao final da simulação está ilustrado a seguir na Tabela 2:

Tabela 2 - Entradas e saídas de Carros no Semáforo de rotinas fixas.

	Entrada	Saída
Rua A	730	727
Rua B	851	800

Fonte: Autorial Própria (2012).

No semáforo Fuzzy o trânsito se comportou conforme ilustrado na Figura 21.

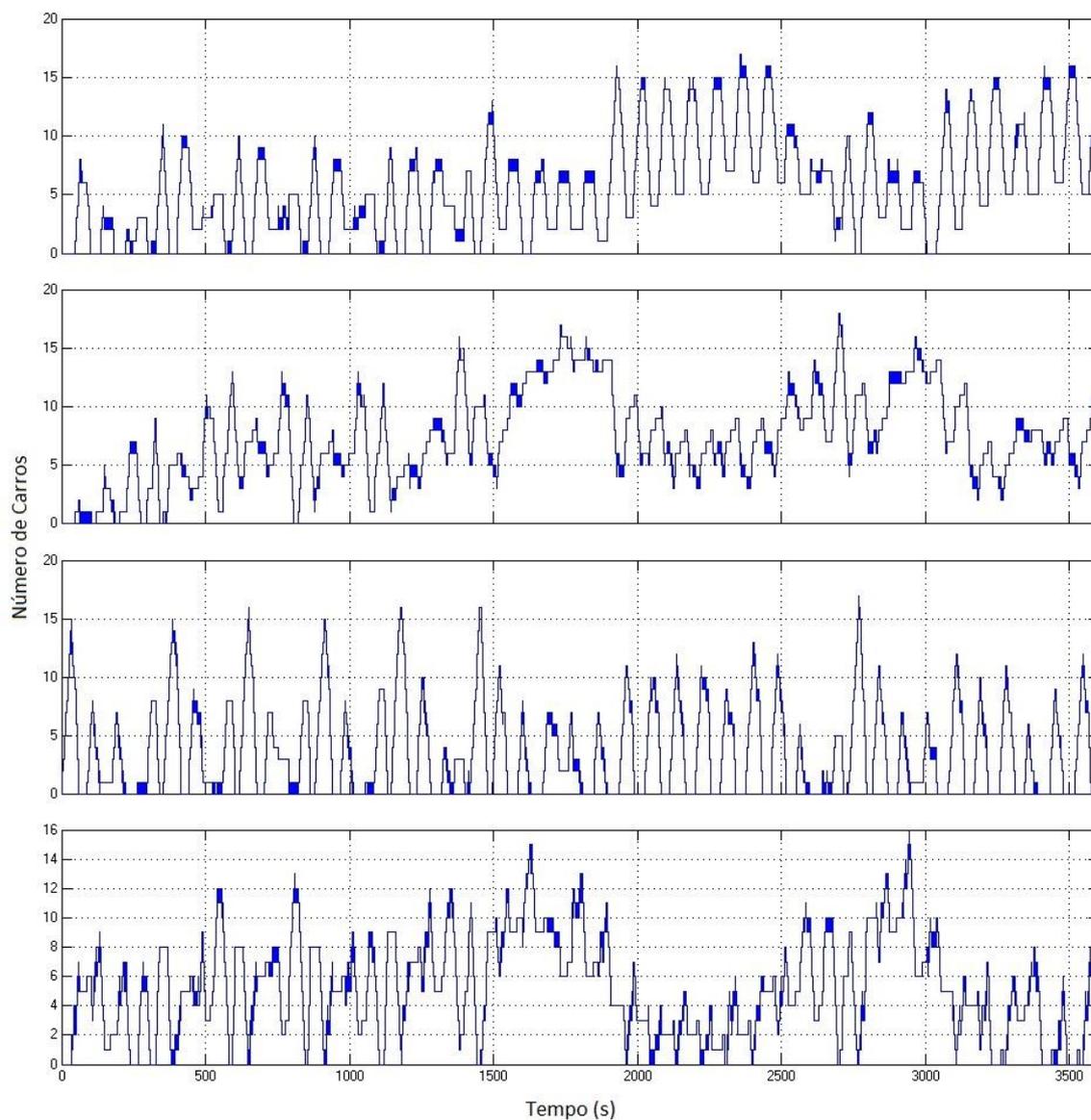


Figura 21 - Tráfego Real para Semáforo Fuzzy.

Fonte: Autorial Própria via MATLAB (2012).

Para o semáforo controlado nota-se que a tendência de acúmulo de carros na Rua Brigadeiro Franco é contornada, havendo maior fluxo de carros em mesmo intervalo de tempo do semáforo de rotinas fixas.

O número de veículos que chegou ao cruzamento, bem como os que saíram do mesmo é mostrado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 - Entradas e saídas de Carros no Semáforo Fuzzy.

	Entrada	Saída
Rua A	730	732
Rua B	851	824

Fonte: Autoria Própria (2012).

Analisando as tabelas de entradas e saídas de carros do cruzamento nota-se que o número de saída não é o mesmo que a entrada, isto ocorre pelo fato que nem todos os carros seguem reto, portanto a diferença desses valores são os carros que fazem a curva, sendo assim contabilizada para a saída da outra Rua.

A configuração Fuzzy, é alcançada devido a modulação dos tempos em que o semáforo encontra-se aberto. Estes tempos são determinados pelas características do trânsito, e analisados através das regras do controlador durante o processo de inferência. A característica inconstante do semáforo pode ser visualizada na Figura 22, na qual os picos representam o tempo máximo de permanência em estado verde e o posicionamento dos mesmos determinam a qual semáforo estão referenciados: quadrante superior referem-se ao semáforo da rua A e quadrante inferior à rua B.

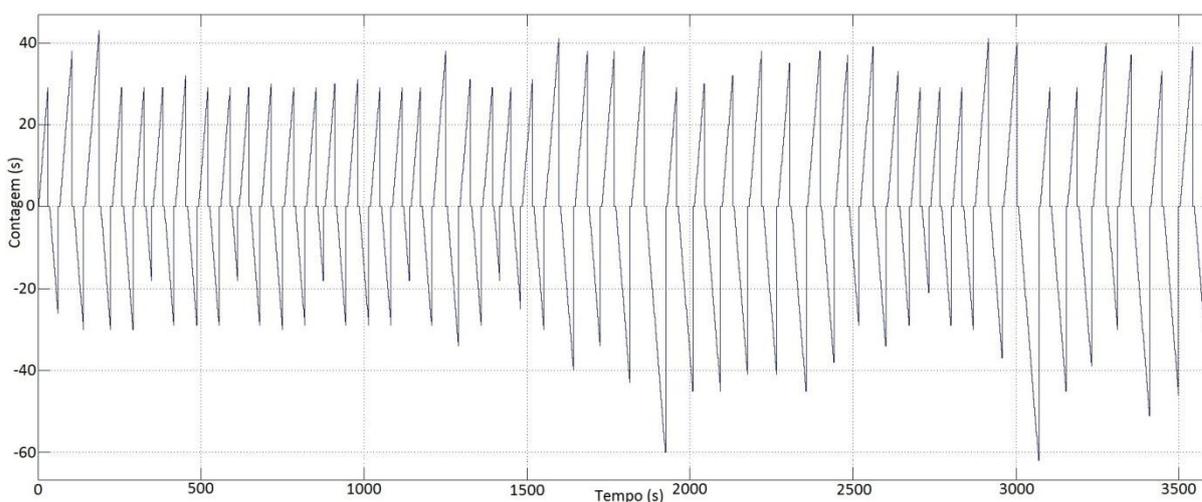


Figura 22 - Modulação de Tempo Fuzzy.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

O gráfico de tempos para o semáforo simples não é apresentado, pois trata-se de ciclos de tempo que se repetem.

6 CONCLUSÃO

A eficiência do controlador Fuzzy foi analisada através de simulações realizadas em ambiente computacional. O controlador projetado apresenta diversas características particulares as quais são consequência de seus modelos de construção, dentre estas se destaca:

- A comunicação indireta dos semáforos controlados, identificado pelo fato da saída de um controlador constituir a entrada do seguinte, sendo esperada, como consequência, uma sincronização das ações dos semáforos. Como principal benefício deste modelo tem-se a redução de custos esperados no controlador semafórico quando atuando em rede, por não necessitar de sistemas comunicação. Há de se ressaltar que este ponto é empírico, sendo sugerido para estudos posteriores.
- O controlador Fuzzy proposto caracteriza um sistema puxado em que o fluxo somente é liberado caso haja a capacidade disponível para absorver os carros que fluem pelo semáforo. Sendo assim o sistema apresenta como principal objetivo evitar situações caóticas melhorando o aproveitamento do tempo ocioso.
- O controlador possuem regras que obrigam a troca do estado do semáforo, independente da situação em que o trânsito possa estar submetido.

As características mencionadas levam o controlador semafórico a apresentar diversos pontos positivos quando comparado ao controlador simples. Focando-se nos resultados simulados deve-se considerar a formação de filas sendo o principal aspecto a ser estudado, bem como os fatores que conduzem aos resultados encontrados.

Os ciclos de tempo do semáforo de encontro da Avenida Presidente Getúlio Vargas e Rua Brigadeiro Franco foram dimensionados para evitar tendências a congestionamentos na avenida, visto que esta é de fundamental importância para a região. Além deste dimensionamento as sincronias temporais dos semáforos da avenida elucidam a cautela em evitar congestionamentos na mesma. Todavia, essa prioridade é realizada em detrimento do estado da Rua Brigadeiro Franco, bem como das demais vias que intersectam a avenida.

Esta situação em que há prioridade da Avenida sobre a Rua pode ser melhor visualizada na Figura 20. Nesta, constata-se que para tempos de simulação superior a 30 minutos, considerando características reais coletadas entre o período de 12h00min à 13h00min, há a tendência de acúmulo de carros, a qual se mantém até o final da simulação.

O controlador que é imbuído da Lógica Fuzzy altera a prioridade dada a uma rua através do monitoramento de acúmulo e a possibilidade de fluxo para destinos prováveis, ou seja, a prioridade é alternada dinamicamente de acordo com a necessidade do sistema e as situações as quais o cruzamento será submetido.

Espera-se que mesmo com eventos singulares que levem a um grande fluxo inesperado para dada rua o semáforo ainda assim apresentará uma resposta adequada.

Para a situação em estudo, através da análise dos gráficos de trânsito resultantes da atuação do controlador Fuzzy, Figura 21, pode-se concluir que a tendência à congestionamento tanto para a Rua Brigadeiro Franco como a Avenida Presidente Getúlio Vargas é contornada.

Logo, constata-se que quanto à formação de filas o controlador Fuzzy apresenta uma resposta mais apropriada que a demonstrada pelo controlador simples, utilizando da prioridade dada as ruas, em questão, para evitar situações de congestionamento. Dois fatores conduzem a este resultado, são eles:

- Modulação de tempo - Nos primeiros instantes em que um semáforo encontra-se aberto, a velocidade pela qual os automóveis fluem é reduzida, visto o tempo de aceleração e resposta das pessoas. O controlador Fuzzy utiliza a modulação destes tempos aumentando e reduzindo os períodos, facilitando o tráfego em ruas que apresentam uma maior necessidade.
- Redução de tempo ocioso - A prioridade do controlador é alterada caso não haja carros em espera. Esta situação é definida na base de regras e pode ser constatada analisando-se os gráficos de trânsito em conjunto com gráficos de tempo.

Por fim, é seguro afirmar que de acordo com a simulação apresentada e todas as outras utilizadas como apoio a essa, que o controlador Fuzzy é capaz de realizar um controle superior ao apresentado por controladores simples, por considerar situações dinâmicas e imprecisas, alterando sua resposta em função destas. Sendo assim a Lógica Fuzzy constitui-se como uma alternativa não apenas viável, mas adequada e sugerida para controladores de trânsito.

7 REFERÊNCIAS

ABBAR, Celina A. A. P. **Noções de Lógica Matemática**. São Paulo. 2004. Disponível em: <<http://www.pucsp.br/~logica/>>. Acesso em 28 de ago. 2011.

ANDRADE, Michelle; JACQUES, Maria A. P. **Estudo para aprimoramento da operação de controladores semafóricos Fuzzy**. Brasília-DF.

ANDRADE, Michelle; JACQUES, Maria A. P; LADEIRA, Marcelo. **Operação em rede arterial sob controle semafórico do tipo Fuzzy**.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO 2010. Curitiba: DETRAN, 2009-2010.

BILOBROVEC, Marcelo. **Sistema Especialista em Lógica Fuzzy para o Controle, Gerenciamento e Manutenção de Qualidade em Processo de Aeração de Grãos**. 2005. 74 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.

CAMPOS FILHO, Pio. **Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando Lógica Fuzzy**. 2004. Disponível em: <<http://teses.eps.ufsc.br/defesa/pdf/7823.pdf>>. Acesso em: 27 de ago. 2011.

CENSO DEMOGRÁFICO 2010. Curitiba: IBGE. 2010.

DRIANKOV, D.; HELLENDORRN, H. E REINFRANK, M. (1996). **An Introduction to Fuzzy Control**, Springer-Verlag.

FILHO, Hélió H. T. **Análise comparativa do potencial de sistemas centralizados para controle de tráfego no Brasil**. 2002. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola profissionalizante em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

Google Maps. Versão 2012. Disponível em: <<https://maps.google.com.br/maps?hl=pt-BR&ll=-25.446005,-49.274084&spn=0.001026,0.002064&t=h&z=20>>. Acessado em: 13 maio 2012.

GOMIDE, Fernando A. C.; GUDWIN, Ricardo R., TANSCHKEIT, Ricardo. 1995. **Conceitos Fundamentais da Teoria de Conjuntos Fuzzy, Lógica Fuzzy e Aplicações**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial, 1995.

GONÇALVES, André P. **Aplicação de Lógica Fuzzy em Guerra Eletrônica**. São José dos Campos, p. 1-5, set. 2007.

IVANQUI, Josmar. **Esteira eletrônica com velocidade controlada por Lógica Fuzzy**. 2005. 104 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

KINOSHITA, Bruno P.; NAKAYA, Daniel H. **Conjuntos Fuzzy e aplicações**. São Paulo, p. 1-11, mai. 2010.

KOHAGURA, Thiago. **Lógica Fuzzy e Suas Aplicações**. 2007. 61 f. Monografia (Conclusão de Curso em Ciência da Computação) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

Manual de semáforos. Brasília: DENATRAN, 2a. ed., 1984.

MARTINS, Wander. F. **Controle Fuzzy em Tempo Real, Aplicado ao Sistema Plataforma-Esfera**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2007.

MATH WORKS. **Defuzzification Methods**. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/demos/shipping/fuzzy/defuzzdm.html>>. Acesso em: 26 abr. 2012.

MEDEIROS, A. V.; MAITELLI, A. L. e GABRIEL FILHO, O. **Otimização das Funções de Pertinência de um Controlador Nebulosos utilizando Algoritmos Genéticos**. V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Canela, RS.

RENTERÍA, Alexandre R. **Controle de Semáforos por Lógica Fuzzy e Redes Neurais**. 2002. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

REYERO, R.; NICOLÁS, C. F. 1995. **Sistemas De Control Basados Em Lógica Borrosa: Fuzzy Control**. Omron Electronics S.A., Espanha, 1995.

REZNIK, Leonid. **Fuzzy Controllers**. Australia: Newnes, 1997.

ROMANI, Maurício. Dados de trânsito. Mensagem recebida por: <setran@setran.curitiba.pr.gov.br> em 10 fev. 2012.

ROSS, Timothy. 1995. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, McGraw-Hill. 1995.

SANDRI, Sandra; CORREA, Cláudio. Lógica Nebulosa. **Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais**, São José dos Campos, p. 1-18, jul. 1999.

Sendai Subway. **Subway**. Disponível em: <<http://www.subways.net/japan/sendai.htm>>. Acesso em: 30 de ago. 2011.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. 1999. **Controle e Modelagem Fuzzy**. Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 1999.

SILVEIRA, Paulo R. **Projeto de Automação de um Sistema de Inspeção de Peças de Cerâmica**. 2004. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

SOUZA, João N. de. **Lógica para Ciência da Computação**. 1. ed. Uberlândia: Campus. 2002.

STURM, Wilerson. **Avaliação do Potencial de Uso da Lógica Fuzzy para a Identificação de Indicadores de Competências no Currículo Lattes**. 2005. 103 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2005.

TANSCHKEIT, Ricardo. 2003. **Sistemas Fuzzy**. VI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, Bauru, SP. 2003.

TORTORIELLO, Alexandre M. Criador do pedágio urbano londrino diz que idéia é solução para o Brasil. **BBC Brasil, 13 out. 2003. Disponível em:** <http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/story/2003/10/031013_pedagioamt.shtml>. Acesso em: 23 out. 2011.

ZADEH, Lotfi A. 1965. **Fuzzy Sets** - Information and Control, vol. 8, pp 338-353, 1965.

APÊNDICE A - Núcleo de trânsito

Para que seja constatado o efeito do controle Fuzzy sobre o trânsito, fez-se necessário a confecção de um modelo de simulação que comporte a inserção dos dados reais, bem como a própria análise Fuzzy. Para tanto, optou-se pela utilização do *software* MATLAB.

Dentro do MATLAB, diversas ferramentas foram analisadas. As tentativas seguintes exploraram as ferramentas matemáticas do Simulink e a biblioteca SimEvents. Por fim, foi estudada a operacionalização da simulação através das ferramentas de Stateflow. A familiaridade com programação similar e sua fácil adequação ao problema em questão fizeram desta saída uma solução viável a ser implementada.

Dentre os vários comportamentos possíveis para o fluxo de automóveis procurou-se emular aqueles que pudessem conferir ao modelamento maior fidelidade ao comportamento real do trânsito sem sobrecarregar a simulação.

Os comportamentos emulados pelo núcleo de trânsito são os seguintes para ambas as vias A e B:

- Entrada de veículos no quarteirão anterior ao semáforo;
- Formação de filas no quarteirão anterior ao semáforo, sendo o valor máximo de veículos acumulados baseado em observações de trânsito real aliado a estimativas feitas pelo grupo;
- Transição de veículos do quarteirão anterior ao posterior ao semáforo;
- Na etapa de transição existe a chance de que alguns veículos façam a conversão de uma via à outra;
- Formação de filas na quadra posterior ao semáforo;
- Saída de veículos do quarteirão posterior ao semáforo.

Vale ressaltar que a aleatoriedade é conferida ao sistema atribuindo-se aos comportamentos de trânsito emulados e descritos anteriormente ao colocar-se taxas de entrada, transição, conversão e saída dependentes de valores aleatórios gerados durante a simulação.

Será descrito a seguir o funcionamento de todas as funções executadas pelo núcleo de trânsito.

Funcionamento

O conjunto de blocos que representa o tráfego é composto basicamente por blocos “*chart*” da biblioteca Stateflow. Essa biblioteca é uma ferramenta gráfica interativa que simula e modela sistemas controlados por eventos, ou seja, as transições de um modo de operação para outro ocorrem em resposta a eventos e condições.

O bloco principal de trânsito, nomeado de “Tráfego” é um bloco “*chart*” da biblioteca citada acima e é constituído por diversos estados e sub-estados que estão divididos em três classes: 1, 2 e 3. A classe a qual pertencem os estados determina a forma como serão executados, simultaneamente ou em série. A classe 2 é uma sub-classe da classe 1, ou seja, os estados pertencentes a classe 2 estão contidos nos estados pertencentes a classe 1. Analogamente a classe 3 é sub-classe da classe 2 e a classe 1 é a classe majoritária, ou seja ela não é sub-classe de nenhuma das outras.

À classe 1 pertencem um estado principal, “TRFG”, que contém todos os estados das demais classes e um estado que tem por função fornecer os valores iniciais de trânsito, “Início”, sendo este último ativado apenas no início da simulação.

Os estados pertencentes à classe 2 são executados simultaneamente e contém os estados da classe 3, que são ativados em série. Esse conjunto de estados e sub-estados é responsável por simular o comportamento do trânsito em um cruzamento. Os conjuntos podem ser agrupados de acordo com a função que desempenham no modelo. Pode-se agrupá-los em 3 funções principais que serão mostradas e explicadas a seguir. A primeira função é realizada pelos conjuntos ilustrados na Figura 23. Estes conjuntos são responsáveis pela entrada de veículos na quadra anterior ao semáforo:

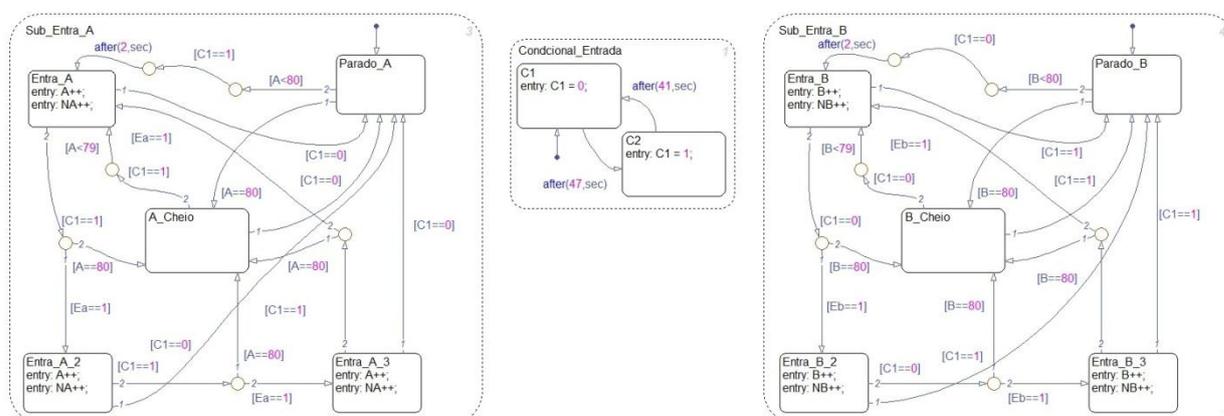


Figura 23 - Classe 1.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Os estados “Sub_Entra_A” e “Sub_Entra_B” tem a função de simular a entrada de veículos na quadra referente as ruas A e B anteriores ao semáforo. O processo é simples e similar para ambos os estados, logo será detalhado para apenas um deles. Isto vale também para as próximas funções principais do modelo, onde haverá sempre 2 estados principais realizando funções semelhantes para as ruas A e B.

As etapas de funcionamento do processo de entrada são as seguintes: inicia-se ativando o estado “Parado_A”, que permanece ativo até que as condições de ativação do próximo estado sejam verificadas. Como este estado não executa nenhuma função, quando ativo, indica que não há fluxo de carros na quadra correspondente, logo representa uma inatividade no estado no qual está contido. As condições para sua desativação são que o número de carros na quadra seja inferior a 80 (limite de carros por quadra) e que a variável *CI* seja igual a 1 e que tenham se passado 2 segundos com as duas condições anteriores verificadas. *CI* é uma variável destinada ao controle de entrada de veículos e será explicada mais adiante. Após verificadas as três condições, aciona-se o estado “Entra_A” que somará 1 tanto a variável que representa o número de carros na quadra (*A*) quanto a que representa o total de carros que entraram na quadra (*NA*). Estas funções de soma se repetem pra os outros 2 estados de nome começado em “Entra” e estes podem ser considerados estados de entrada.

As condições para o próximo estado de entrada seja ativado são que *CI* e *Eb* sejam iguais a 1. A variável *Eb* é computada por um sistema a parte, denominado “Aleatoriedade”. O sistema e suas variáveis serão comentados mais adiante no texto.

Para o caso em que o número de carros na quadra atinja 80 ($A = 80$), o estado “A_Cheio” é ativado. Este estado é ativado a qualquer momento da simulação, desde que o número de carros atinja valor igual a 80. Também pode ser considerado um estado de inatividade, pois não executa função alguma quando acionado, mas tem função de limitar a entrada de carros na quadra. As condições para que seja desativado são que o número de carros na quadra seja inferior a 80 e que $CI = 1$. Para o caso de *CI* assumir valor igual a 0, será ativado o estado inicial, estando acionado qualquer um dos demais estados contidos em “Sub_Entra_A”.

As condições de transição de todos os estados de entrada contidos em “Sub_Entra_A” são iguais, logo enquanto não se verificar as condições que levam aos estados de inatividade o sistema alterna apenas entre os estados de entrada, produzindo um fluxo de entrada.

O estado “Condicional_Entrada” tem a função de alternar entre períodos de entrada nas ruas A e B, sendo que quando há entrada de veículos na rua A não há na rua B e vice-versa. Esta função é alcançada através da variável *CI*, citada anteriormente, que pode assumir

apenas dois valores, 0 ou 1. Estes valores mudam após decorrido um certo intervalo de tempo. O valor assumido por esta variável, como visto anteriormente, é condição de transição entre todos os estados contidos em “Sub_Entra_A” e “Sub_Entra_B”, logo, sendo $CI = 0$, por exemplo, apenas o estado de entrada na rua B tem condição de alternar entre seus sub-estados.

A simulação de veículos que passam pelo semáforo é atingida utilizando-se os estados demonstrados na Figura 24 mostrada a seguir.

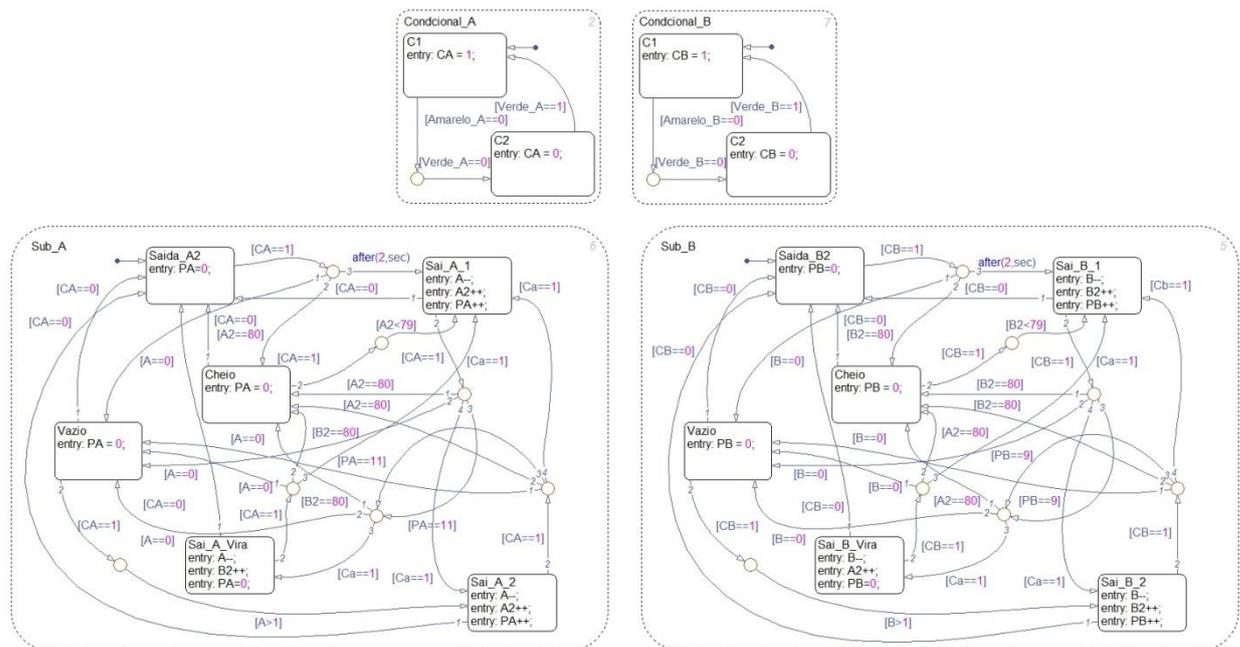


Figura 24 - Simulação de veículos que passam pelo semáforo.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Os estado “CondicionaL_A” e “CondicionaL_B” são responsáveis por simular o comportamento de carros que passam pelo semáforo enquanto este mostra sinal verde ou amarelo. Estes estados recebem sinais externos oriundos da interface semafórica correspondente a rua que representa e alteram o valor de suas variáveis internas (CA e CB) entre 0 e 1. O valor 1 de CA e CB é condição de transição de todos os sub-estados de “Sub_A” e “Sub_B”, respectivamente, e o valor 0 aciona o sub-estado inicial dos mesmos. Por estarem atreladas aos sinais da interface semafórica correspondente, CA e CB não assumirão valores iguais ao mesmo tempo.

Os estados “Sub_A” e “Sub_B” emulam a passagem de veículos através do semáforo, seguindo para as quadras após o mesmo. No momento da passagem dos veículos para a

quadra seguinte, seguindo proporção observada em trânsito real, uma determinada quantia de veículos vai para a quadra seguinte de rua diferente da qual foi originada, representando os carros que fazem a conversão a direita, se partindo da rua A e a esquerda se partindo da rua B após a passagem pelo semáforo.

O funcionamento do estado em questão é semelhante ao estado responsável pela entrada de carros na quadra, porém são acrescentados de algumas particularidades. O estado inicial denomina-se “Saida_A2” e quando ativo executa apenas uma tarefa que é igualar a 0 a variável PA . Esta variável tem papel importante no funcionamento da simulação e será comentada mais adiante. Para que se realize a transição para o próximo modo de operação é necessário que CA assuma valor 1, porém após verificada essa condição há 3 transições possíveis, que são:

- Para o caso em que a quadra anterior ao semáforo esta vazia ($A = 0$), o estado “Vazio” é ativado, evitando-se a situação em que o número de automóveis na quadra anterior ao semáforo seja negativo. Além disso esse estado também torna PA igual a 0;
- Para o caso de que a quadra após o semáforo esteja cheia ($A2 = 80$), o estado “Cheio” é ativado. Este estado tem as mesmas características do estado “Vazio”, porém é empregado para evitar que se exceda o limite de carros na quadra após o semáforo;
- Por fim, se decorridos 2 segundos sem que seja verificada nenhuma das demais condições da bifurcação da transição, o estado “Sai_A_1” é ativado.

O estado “Sai_A_1” realiza 3 funções quando ativado, que são: subtrair 1 do valor de carros na quadra anterior ao semáforo (A) e somar 1 a PA e ao valor de carros na quadra após o semáforo ($A2$).

Para que haja a transição de “Sai_A_1” para o próximo estado é também necessário que CA assuma valor igual a 1e bem como a transição anterior há mais de uma possibilidade após verificado $CA=1$. Duas delas são as possibilidades de quadra vazia e quadra cheia comentadas anteriormente, as outras são que a variável Ca assuma valor 1, se verificada essa condição o estado “Sai_A_2” é acionado, ou que PA atinja valor pré determinado, sendo para este caso acionado o estado “Sai_A_Vira”.

A variável Ca é computada pelo sistema “Aleatoriedade” que será comentado mais adiante. Já a variável PA , mencionada anteriormente, é responsável por emular parte do comportamento de veículos que, ao passarem pelo semáforo, não permanecem na mesma rua, ou seja, viram para a outra rua do cruzamento. O valor estabelecido como condição de

transição é a proporção de carros que viram. Exemplo: se $PA = 11$ então teremos um carro que vira para cada 11 que passam através do semáforo. O estado que completa o comportamento de “virar” é o “Sai_A_Vira”. Este estado efetua as seguintes funções: subtrai 1 do valor de A , soma 1 ao valor de carros na quadra após o semáforo da rua B ($B2$) e iguala o valor de PA a 0. As condições e possibilidades de condições que partem deste estado são semelhantes as do estado “Sai_A_2”, porém não há condição envolvendo a variável PA .

As funções, bem como as condições para que haja a transição do estado “Sai_A_1” se repetem para o estado “Sai_A_2” e não havendo condições para ativação dos estados “Cheio”, “Vazio” ou “Saida_A2” o sistema alterna entre os 3 estados que passam veículos da quadra anterior para as quadras posteriores ao semáforo, gerando assim um fluxo de passagem de automóveis.

Por fim, a função de saída de automóveis da quadra posterior ao semáforo é efetuada pelos conjuntos apresentados na Figura 25 a seguir:

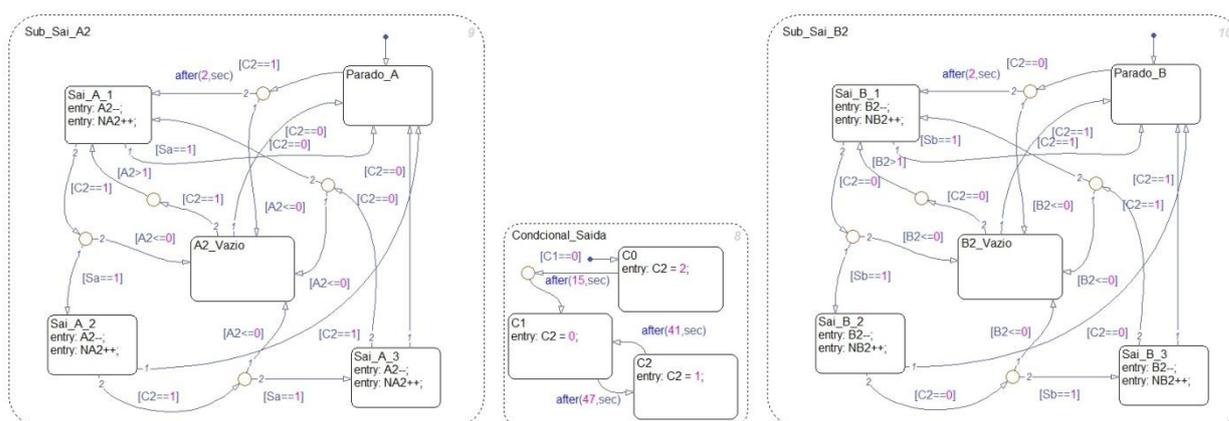


Figura 25 - Saída de Automóveis.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

As funções executadas pelos conjuntos “Sub_Sai_A2”, “Sub_Sai_B2” e “Condicional_Saida” são as mesmas efetuadas pelos estados que realizam a entrada de carros nas quadras anteriores ao semáforo, porém modificadas as funções dos sub-estados de entrada para que subtraíam carros das quadras posteriores ao cruzamento (variáveis $A2$ e $B2$) e somem as variáveis destinadas a contagem total de carros que passaram através do cruzamento (variáveis $NA2$ e $NB2$).

O estado “Condicional_Saida” realiza a mesma função que o estado “Condicional_Entrada” porém há uma modificação para que o ciclo de saída se inicie após decorrido certo tempo do início do ciclo de entrada.

A Figura 26, exibida a seguir ilustra todos os conjuntos posicionados da mesma maneira como estão no programa.

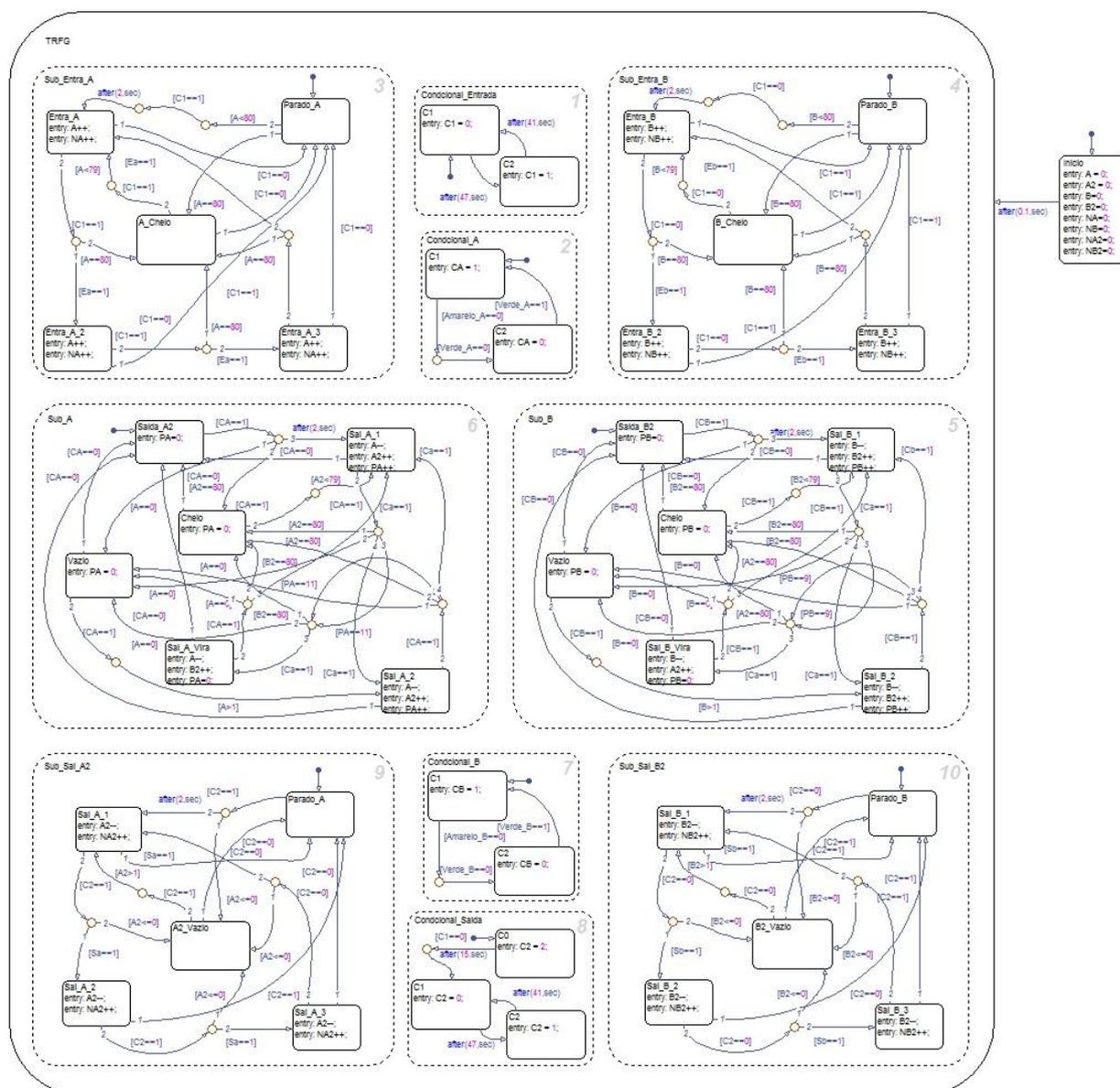


Figura 26 - Tráfego.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Uma parte importante do núcleo de trânsito que não foi comentada até agora é o sistema “Aleatoriedade”. Como o nome sugere, este sistema confere o comportamento aleatório de movimentação dos automóveis. A Figura 27 mostrada a seguir é o sistema como um todo:

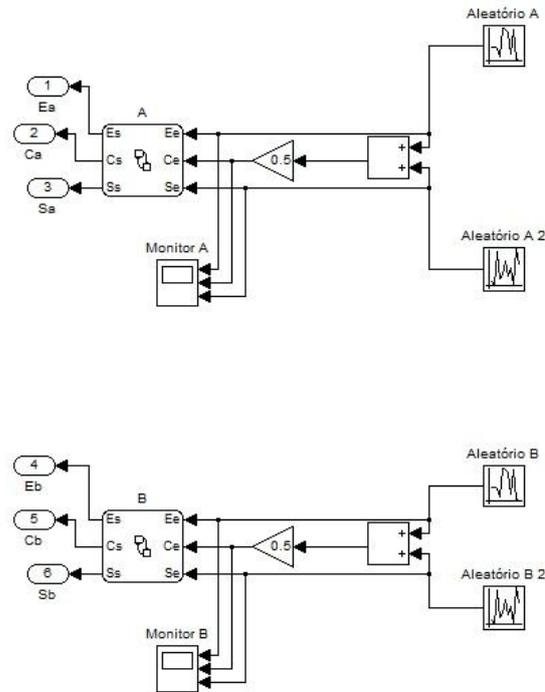


Figura 27 - Sistema de Aleatoriedade.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB.

O sistema executa funções muito parecidas para ambas às montagens, a diferença entre elas são particularidades atribuídas ao comportamento do trânsito de cada rua, logo será referenciado na explicação apenas uma delas.

O funcionamento se processa da seguinte maneira: são gerados 3 sinais aleatórios distintos. Estes sinais possuem limitações de valores superior e inferior e períodos de geração pré-definidos. O arranjo mostrado acima para a geração dos sinais se faz necessário devido a limitações de geração de aleatoriedade do *software*.

Os sinais gerados são recebidos pelo bloco “*chart*” nomeado de acordo com a rua a qual está referenciado. A programação deste bloco é dividida em 3 estados que fazem funções semelhantes sendo executados simultaneamente. Logo pode-se demonstrar o funcionamento de apenas um e estender tal explicação aos demais. É ilustrado o estado responsável pelo processamento do primeiro sinal aleatório na Figura 28 a seguir:

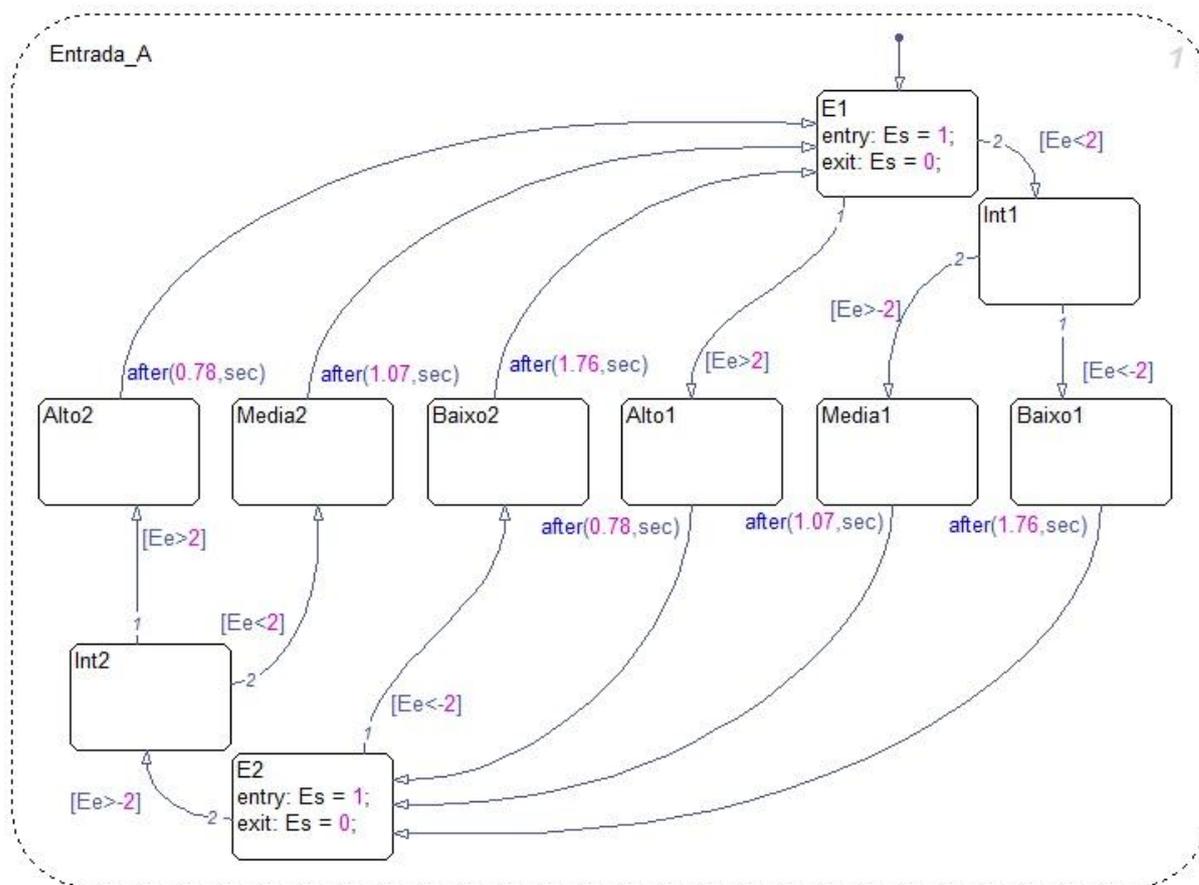


Figura 28 - Processamento do Primeiro Sinal Aleatório.

Fonte: Autoria Própria via MATLAB (2012).

Os estados “E1” e “E2” tem a função de alterar os valores da variável Es entre 0 e 1. As condições para transição deles para o próximo estado são exatamente iguais, logo esse sistema não possui estados de inatividade por longos períodos de tempo.

Existem 3 possibilidades para as transições de “E1” que estão relacionadas ao sinal aleatório que recebe. Se o valor deste sinal for superior a 2, por exemplo, o estado “Alto1” será ativado e após um período de tempo o estado “E2”. As outras possibilidades dependem de que o valor assumido pelo sinal aleatório esteja situado em faixas distintas da citada acima e implicam um intervalo de tempo distinto para que seja ativado “E2”. A mesma situação ocorre para que o estado “E1” seja ativado novamente, logo tem-se variações de Es com períodos aleatórios. A variável Es , bem como as demais variáveis geradas pelo sistema aleatoriedade apresentam este comportamento de variação e estão associadas as transições dos sub-estados entrada, passagem e saída de veículos no cruzamento explicados anteriormente.

Estas considerações de tempo foram feitas em um sistema a parte para reduzir as funções agregadas ao bloco de nome “Tráfego”, reduzindo assim a poluição visual e melhorando a compreensão sobre o mesmo.