

**UNICAMP - UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA COMPUTAÇÃO E AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL**

**UM CONTROLE ADAPTATIVO**  
**BASEADO EM LÓGICA NEBULOSA**  
**PARA TRÁFEGO URBANO**

**ANDRÉIA CRISTINA GRISÓLIO MACHION**

**ORIENTADOR: FERNANDO A. C. GOMIDE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica - FEE, da Universidade Estadual de Campinas UNICAMP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Campinas, Julho de 1993

*Dedico este Trabalho aos meus Pais,  
pela Confiança e Apoio,*

# AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Fernando, por ter mostrado o caminho;

A José Roberto Favilla, pela valiosa contribuição;

Aos companheiros de mestrado, por enfrentar juntos comigo, esta batalha;

A José Geraldo Ortigosa, meu chefe, pela compreensão;

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Devido à simplicidade de implementação e à facilidade em tratar com incertezas em sistemas complexos, a lógica nebulosa vem sendo utilizada em uma grande variedade de aplicações.

Este trabalho apresenta um sistema para controle *on-line* de tráfego urbano, baseado nesta lógica, para o qual foram estudados regras e métodos de tomada de decisão mais adequados que aqueles propostos na literatura. O controle desenvolvido leva em consideração as condições de tráfego no instante da tomada de decisão.

Além disso, estratégias de adaptação foram também desenvolvidas. O esquema adaptativo ajusta as funções de pertinência de acordo com as condições do tráfego no momento da tomada de decisão. Utilizou-se métodos estatísticos e a própria lógica nebulosa para tal, sendo que esta última se mostrou mais eficiente na maioria dos casos.

Um estudo de caso que trata o cruzamento entre as Avenidas Rebouças e Brasil na cidade de São Paulo foi realizado afim de mostrar a factibilidade da estratégia de controle proposta. Os resultados das simulações mostram que estratégias de controle baseadas em Lógica Nebulosa são viáveis para o controle de cruzamentos de vias urbanas.

# ABSTRACT

Due to the greater simplicity of implementation and the facility in handling uncertainty, vagueness in complex systems, fuzzy logic has been used in a large variety of applications.

This work presents an on-line fuzzy-logic based urban traffic control system. New rules and decision-making criterion were developed and implemented. The new controller makes the decisions according to the traffic conditions at a time.

Adaptive strategies were also developed. The adaptive schemes adjust the membership functions according to the traffic conditions. The methods developed are: statistical-adaptive and fuzzy-adaptive. The results showed that the second one has, in average, a better performance.

A case study concerning the junction of Brasil Ave and Rebouças Ave of the city of São Paulo was conducted to investigate the feasibility of the control schemes proposed. Simulation results testify that the fuzzy controllers are a viable alternative for junction control.

# CONTEÚDO

1. INTRODUÇÃO	01
1.1. Controle de Tráfego Urbano	01
1.2. Motivação e Objetivos	02
1.3. Organização da Tese	03
2. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO	04
2.1. Introdução	04
2.2. Fundamentos da Engenharia de Tráfego	04
2.3. Descrição dos Tipos de Cruzamento	08
2.4. Desempenho de Cruzamentos Controlados	11
2.5. Sistemas Convencionais para Controle de Tráfego	14
2.6. Sistemas Avançados para Controle de Tráfego	17
2.7. Resumo	31
3. SISTEMA NEBULOSO PARA CONTROLE DE TRÁFEGO	32
3.1. Introdução	32
3.2. Desenvolvimento do Controlador Nebuloso	33
3.3. Cruzamento Multi-Fases	39
3.4. Resumo	41
4. ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO	42
4.1. Introdução	42
4.2. Adaptação Estatística	43
4.3. Adaptação Via Lógica Nebulosa	45
4.4. Resumo	55
5. UM ESTUDO DE CASO	56
5.1. Introdução	56
5.2. O Cruzamento	56
5.3. Simulações	57
5.4. Resumo	68
6. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	69
6.1. Conclusões	69
6.2. Perspectivas Futuras	70
BIBLIOGRAFIA	71

# 1. INTRODUÇÃO

Na grande maioria dos centros urbanos, o controle de cruzamentos é feito por semáforos. Usualmente estes semáforos não dispõem de sistemas computadorizados que os auxiliem em suas decisões. Assim, não levam em consideração, por exemplo, as condições do tráfego que flui em um determinado período de tempo no qual é tomada a decisão sobre o período de verde para uma via. Isto provoca a degradação do sistema, acarretando esperas em filas, deterioração das condições de tráfego, congestionamentos, poluição, etc.

Nos últimos anos, um aumento do interesse em solucionar este tipo de problema vem sendo observado. Soluções apropriadas exigem mais do que simplesmente tecnologia. Elas também exigem conhecimento do problema e capacidade para analisar os possíveis resultados de suas implementações.

Seria ingênuo imaginar que cada cruzamento de uma malha viária urbana se comporta como um sistema isolado. Porém é preciso ter uma célula funcionando bem para que ela constitua um organismo saudável. Neste trabalho somente um único cruzamento a ser controlado por um sistema que baseia suas decisões nas condições de tráfego ao longo do tempo, será considerado.

## 1.1. Controle de Tráfego Urbano

A maioria das vias urbanas de uma cidade estão em um mesmo plano, ocasionando conflito entre fluxos de tráfego que concorrem num determinado cruzamento, atrasos e até acidentes. Um problema típico estudado é o controle dos semáforos que distribuem os tempos de verde para cada uma das vias concorrentes, visando minimizar os atrasos e o tamanho das filas que se formam, tornando assim, o trânsito mais seguro.

Este é um problema complicado, pois cada cruzamento apresenta características próprias, tais como: *layout* físico, razão de fluxo de veículos, fluxos de conversão, movimento de pedestres, etc. Além disso, é preciso estar atento ao fato de que se uma fase verde para uma determinada via é muito longa, uma fila muito grande estaria se formando do lado vermelho, o qual também necessitaria um outro verde muito longo e assim por diante. É possível perceber, a partir deste raciocínio, que ponderações entre os fluxos de todas as vias concorrentes devem ser considerados para se tomar a decisão sobre os tempos de verde para cada uma delas.

Desde as duas últimas décadas, vários tipos de trabalho têm sido desenvolvidos na área, desde os chamados sistemas de ciclo fixo, onde os planos do semáforo são gerados *off-line*, baseados em estatísticas e aplicados *on-line*, e os sistemas *on-line*, nos quais os planos são gerados *on-line* e aplicados diretamente ao tráfego.

O método mais tradicional de controle é aquele no qual o tempo de verde para cada via é sempre o mesmo e o ciclo de fases também é fixo (Webster, 1958). O estado da arte para a maioria dos centros urbanos considera sistemas onde o controle é baseado em estatísticas anteriores, com vários planos para duração de verde para cada fase, que se alternam ao longo do dia mudando de um plano fixo para outro.

Nos últimos anos, controles mais sofisticados vem sendo desenvolvidos: controles baseados na Teoria de Controle Hierárquico (Khalili, 1985); controles baseados na Lógica Nebulosa (Pappis e Mamdani, 1977), e os chamados Controles Adaptativos que podem utilizar como ferramenta de adaptação as Redes Neurais (Barnard e Shaw, 1992). Estes tipos de controle levam em consideração as condições de tráfego e as prioridades de cada via do cruzamento, mas ainda não estão comercialmente disponíveis. Existem até estudos exclusivos sobre estratégias para tráfego saturado (Canuto e Villa, 1982) sendo que cada uma delas apresenta suas vantagens e desvantagens.

## 1.2. Motivação e Objetivos

Problemas no trânsito são problemas com os quais qualquer pessoa pode se deparar, mesmo que ela more em cidades de médio porte, uma vez que congestionamentos em cruzamentos não são exclusivos de metrópoles.

O fato de um motorista ficar esperando em uma fila enquanto uma outra se esvazia o leva a irritações. A situação piora quando ele tem que esperar mas não existe nada acontecendo do outro lado, isto é, não há fila concorrente, fazendo com que este venha a cometer imprudências, podendo até ocasionar acidentes.

Um trajeto, seja ele para o trabalho, para um passeio, ou qualquer destino, é tanto mais agradável quanto menor for o tempo perdido nele.

Em estudos recentes (Mahalel, Gur e Shiftan, 1991) mostrou-se que o controle manual oferece vantagens com relação aos controles automáticos convencionais, em diversas condições de tráfego.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver e analisar um Sistema de Controle Inteligente de Semáforos, que funcione como um guarda de trânsito bastante coerente. Baseado na Lógica Nebulosa, o sistema possibilita que o protocolo e o processo de tomada de decisão sejam baseados no conhecimento e no raciocínio humano. Mais ainda, o sistema de controle deverá se adaptar às diversas condições de tráfego ao longo de um dia, tendo em vista que os dias também têm fluxos diferentes, ou seja, a decisão tomada num determinado instante é baseada no tráfego daquele mesmo instante. Duas estratégias de adaptação serão consideradas. Uma baseada em dados estatísticos, a outra baseada também na Lógica Nebulosa.

### 1.3. Organização da Tese

A tese está organizada da seguinte maneira:

No próximo capítulo serão expostos o problema a ser tratado e os conceitos fundamentais a ele relacionados, bem como as várias abordagens para sua resolução até agora desenvolvidas, abrangendo desde as mais simples até as mais sofisticadas. Apresenta-se também uma análise das vantagens e desvantagens de cada uma delas.

O capítulo 3 descreve detalhadamente o esquema de controle desenvolvido, em todas as suas fases, incluindo o ambiente de simulação que evolue de acordo com o desenvolvimento do controlador .

A seguir, no capítulo 4, são estudadas as estratégias de adaptação bem como suas características, apresentando alguns resultados.

No capítulo 5 faz-se um estudo de caso. São também feitas simulações comparando resultados obtidos pelo controlador desenvolvido e por aqueles que utilizam as técnicas convencionais.

Finalmente, apresenta-se no capítulo 6 as conclusões e as perspectivas futuras.

## 2. SISTEMAS DE CONTROLE DE TRÁFEGO

### 2.1. Introdução

Este capítulo trata primeiramente dos conceitos fundamentais da Engenharia de Tráfego, necessários à compreensão do problema aqui tratado.

Serão feitas as descrições dos vários tipos de cruzamentos e dos vários tipos de controle utilizados para os mesmos, assim como das medidas de desempenho para cruzamentos controlados.

Finalmente, serão apresentados os tipos mais relevantes de estratégias de controle para semáforos hoje disponíveis.

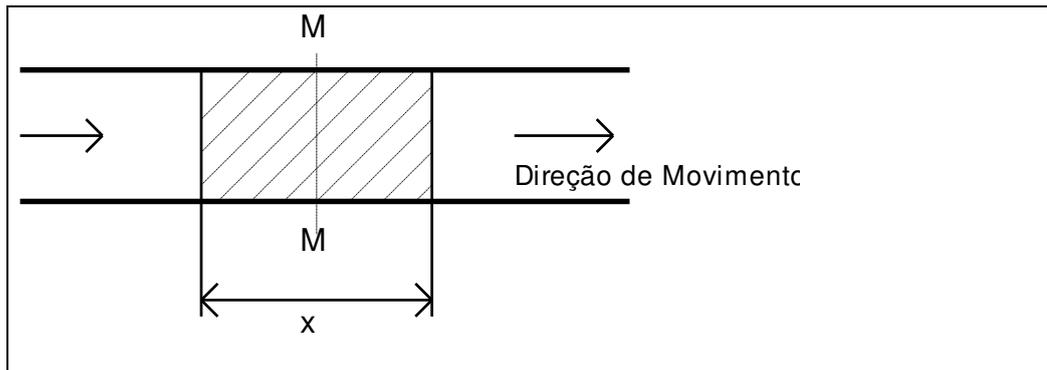
### 2.2. Fundamentos da Engenharia de Tráfego

A Engenharia de Tráfego tem por objetivo a aplicação de princípios científicos, ferramentas, métodos e técnicas para possibilitar o movimento de pessoas e de mercadorias, de uma maneira rápida, segura, confortável, conveniente e econômica (Wohl e Martin, 1967). Considerando esta uma definição aceitável, tem-se os seguintes componentes para a descrição do tráfego:

- **Composição:** : tipo de tráfego e suas características. É constituída por duas classes de veículos: aquela para o movimento de pessoas e aquela para o movimento de cargas.
- **Volume:** quantidade de veículos que está se movendo.
- **Origem e Destino:** de onde vem e para onde vai o fluxo .
- **Qualidade:** como o tráfego está se movendo.
- **Custo:** quão caro é manter uma determinada qualidade de tráfego.

A Teoria de Fluxos de Tráfego leva em consideração 3 elementos fundamentais: composição, volume e qualidade. Ao tratar problemas que envolvem fluxos, são necessárias algumas definições e relações básicas, para o desenvolvimento de soluções adequadas.

Considera-se como sendo uma **via**, um conjunto de **faixas** de fluxos que podem se mover em várias direções, figura 2.1.



**Figura 2.1 - Via de Trânsito: Secção e distância determinadas**

Sendo  $n$  o número de veículos que cruzam a secção MM durante um intervalo de tempo  $T$ , pode-se definir:

- **Fluxo** ou **Volume (V)**: número de veículos que passam por um dado ponto numa unidade de tempo (veículos/hora):

$$V = \frac{n}{T} \quad (2.01)$$

- **Densidade** ou **Concentração (D)**: número médio de veículos que trafegam por uma unidade de comprimento da via (veículos / KM):

$$D = \frac{\sum_{i=1}^n t_i / T}{x} \quad (2.02)$$

onde:

$t_i$  = tempo para o  $i$ -ésimo veículo se mover pela distância  $x$ ;

$\sum_{i=1}^n t_i / T$  = número médio de veículos que passam por  $x$

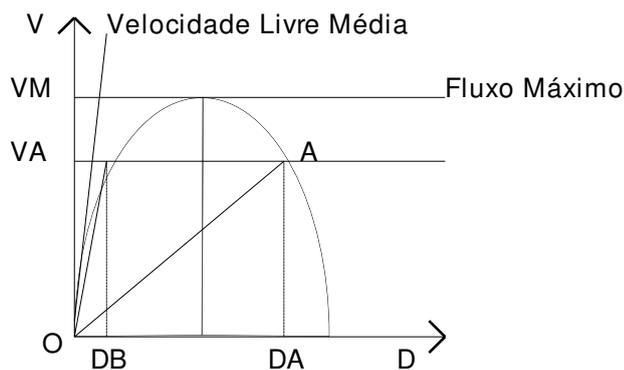
- **Espaço Velocidade Média** ou **Velocidade Média ( $\bar{U}_s$ )**: média das velocidades dos veículos que trafegam por um dado comprimento de via e ponderado de acordo com o tempo gasto para atravessar este comprimento (Km / hora):

$$\bar{U}_s = \frac{V}{D} \quad (2.03.a) \text{ Erro! Indicador não definido.}$$

$$\bar{U}_s = \frac{x}{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i} \quad \text{ou} \quad (2.03.b)$$

- **Distância de *Headway* ou Espaço (s)**: distância entre a frente de um veículo e a frente do próximo (m).
- **Tempo de *Headway* (h)**: tempo entre a chegada da frente de um veículo e a chegada da frente do próximo (s).
- **Unidade de tempo de viagem (m)**: tempo de viagem por unidade de distância (s).
- **Capacidade de uma Via** : fluxo máximo de veículos que pode passar através de uma secção da via.
- **Capacidade de um Cruzamento ou Grau de Saturação**: fluxo máximo que pode atravessar um cruzamento, durante uma fase de verde.

Uma vez definidos os conceitos acima, é possível estabelecer algumas relações entre eles. Uma relação bastante importante é a existente entre o fluxo e a densidade de tráfego. Esta se constitui no Diagrama Básico de Tráfego em Rodovias conforme ilustra a figura 2.2:



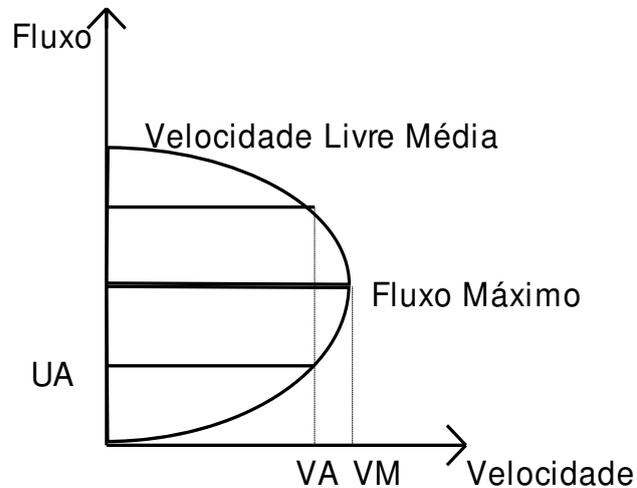
**Figura 2.2 - Diagrama Básico do Tráfego em Rodovias**

Este diagrama é importante porque ilustra todas as situações de tráfego que podem ocorrer:

- o fluxo é zero quando a densidade é zero ou máxima (Dj), o que define a densidade de congestionamento;
- o fluxo começa a diminuir antes que a densidade seja máxima;
- sendo a velocidade média a razão entre o fluxo e a densidade, a inclinação do segmento  $\overline{OA}$  representa o espaço velocidade média para o fluxo VA e densidade DA;

- a velocidade livre média é a velocidade que os motoristas assumem quando a rodovia está praticamente livre, ou seja não há interferência dos outros veículos; acontece quando o fluxo e a densidade tendem a zero.

Outra relação importante é a existente entre a velocidade e o fluxo, conforme figura 2.3:



**Figura 2.3: Relação Fluxo x Velocidade**

Neste diagrama pode-se observar que :

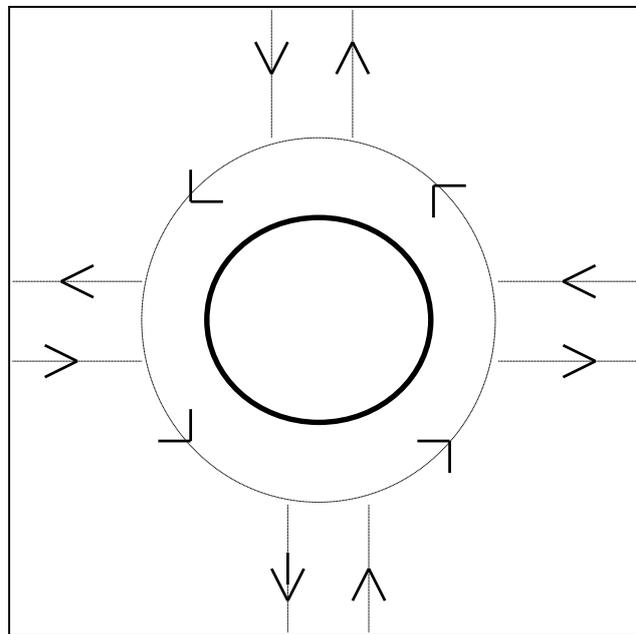
- na parte superior da curva, a medida que o fluxo aumenta, a velocidade média diminui, e como consequência, o tempo de viagem aumenta;
- na parte inferior da curva, quando o fluxo se aproxima do máximo, a dinâmica do fluxo de tráfego ou a ação de uma onda de choque podem diminuir a velocidade. Neste caso, o fluxo máximo que pode passar por uma secção da via reduz-se a um valor  $VA$ , e a velocidade a  $UA$  o que constitui uma situação indesejável.

## 2.3. Descrição dos Tipos de Cruzamento

Cada cruzamento tem suas próprias características, que vão desde o *layout* físico até o movimento que passa por ele, e são exatamente estas características que definem o tipo de estratégia de controle que deve ser adotada para fazer com que os fluxos concorrentes passem de maneira harmoniosa.

Segundo o tipo de controle, os cruzamentos classificam-se em:

- **Não controlados:** quando as vias concorrentes têm importância similar e os fluxos de veículos são baixos.
- **Com prioridade:** quando uma das vias tem prioridade sobre as outras. A via de menor importância tem um **Pare** obrigatório.
- **Compartilhado por Espaço:** é usado para baixo e médio volumes, e a prioridade é idêntica para todos os fluxos, é caracterizado por rotatórias e permite o movimento contínuo, figura 2.4.

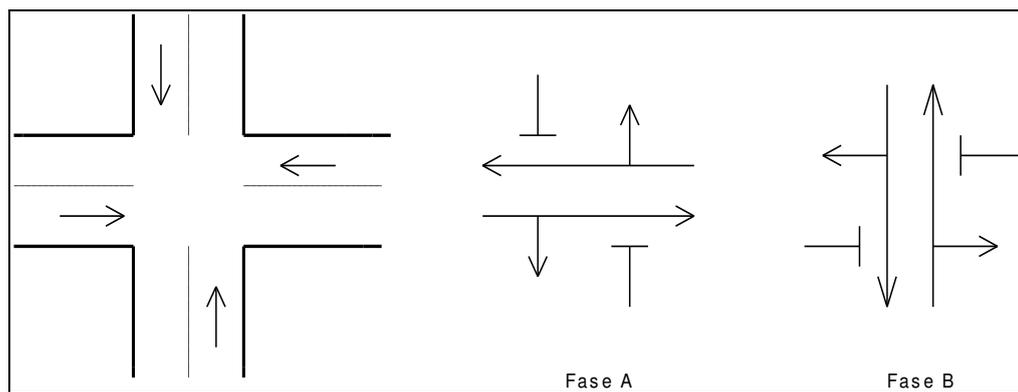


**Figura 2.4:** Esquema de um Cruzamento Compartilhado por espaço

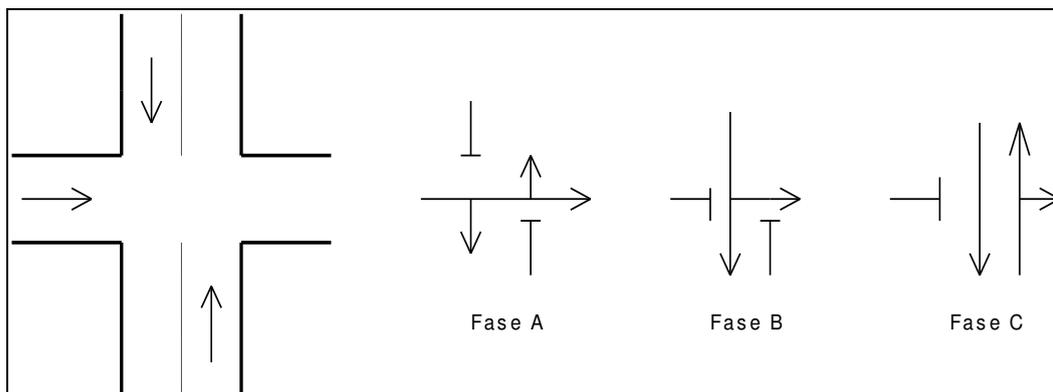
- **Compartilhado por Tempo:** a preferência para cada fluxo é alternada sendo que cada via a tem em instantes de tempo diferentes. Este tipo de controle é feito normalmente por semáforos. Para entender melhor o funcionamento de um semáforo, existem algumas convenções que podem ser adotadas:
- **Estado:** indica uma determinada cor para uma determinada via concorrente ao cruzamento;

- **Fase:** constitui-se num conjunto de estados de um determinado instante;
- **Ciclo:** engloba um conjunto de fases de maneira que todas as vias tenham o direito de movimento pelo menos uma vez.

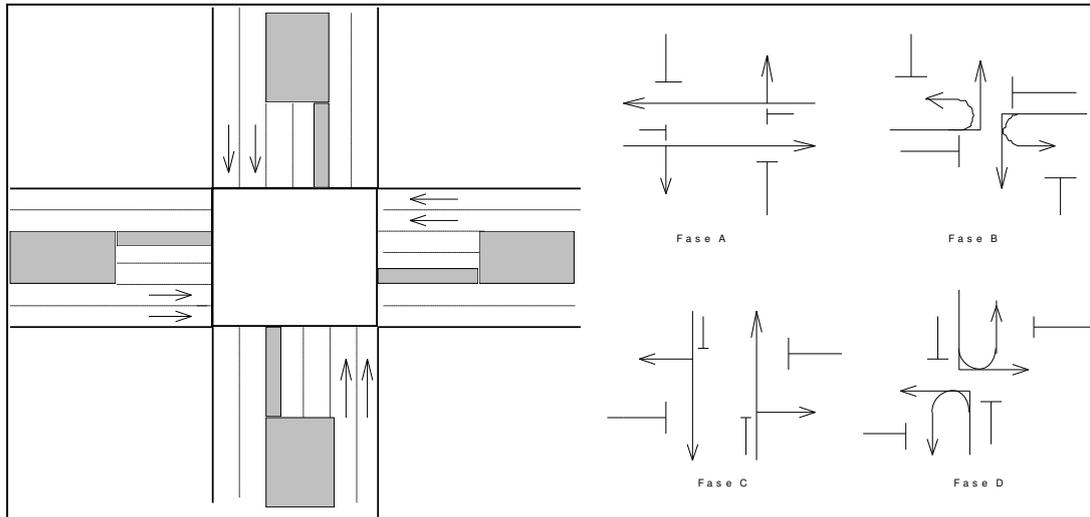
O semáforo, devido à sua ação de controle, pode causar um atraso em cada fluxo. Sendo assim, ele se torna tanto mais eficiente quanto menor for esse atraso. Como cada cruzamento possui o seu *layout* próprio, o semáforo deve ser flexível a ponto de adaptar o número de fases que compõe cada ciclo de acordo com este *layout*. Alguns exemplos podem ser vistos e comparados nas figuras 2.5a, 2.5b e 2.5c abaixo.



**Figura 2.5.a: Layout Físico para um Cruzamento com 2 Fases**



**Figura 2.5.b: Layout Físico para um Cruzamento com 3 Fases**



**Figura 2.5.c: Layout Físico para um Cruzamento com 4 Fases**

Considerando-se um único cruzamento, os semáforos podem ser classificados de acordo com o grau de flexibilidade em se ajustar às condições de tráfego, variando o ciclo total e/ou a duração de cada fase. Esta classificação pode ser:

- **Semáforos de Ciclo Fixo:** o ciclo total e a duração de cada fase são determinados a priori segundo dados estatísticos e permanecem fixos durante o dia todo, ao longo dos dias.
- **Semáforos Semi-Atuados:** a duração do ciclo total e de cada fase são variados *off line*, de acordo com a chegada de veículos na via secundária, onde existem detectores de veículos. Isto significa que são feitas revisões periódicas, para os tempos do semáforo, levando-se em consideração as informações dos detectores que estão em apenas uma das vias.
- **Semáforos Totalmente Atuados:** são utilizados em situações quando ocorre o cruzamento entre duas avenidas principais, onde se tem um alto fluxo de veículos. Nesse caso, os detectores são colocados em ambas as vias, e a duração do ciclo total assim como a de cada fase são ajustados também *off line*, de acordo com o volume do fluxo de tráfego em cada via. Neste caso, as revisões periódicas do tempo levam em consideração as informações de todas as vias concorrentes.
- **Sistemas Atuados On-line:** são constituídos basicamente por um conjunto de semáforos e detectores que permitem um ajuste contínuo da duração do ciclo total e de cada fase de acordo com os dados obtidos referentes a chegadas de veículos no cruzamento e tempo de espera nas filas. Esse tipo de controle responde melhor às condições de tráfego e flutuações no volume em cada instante.

Como dito anteriormente, na maioria dos centros urbanos não é adequado limitar-se a cruzamentos isolados, devido às suas proximidades físicas e interdependências, sendo assim, é necessário considerar todo o conjunto de cruzamentos que forma uma rede.

Os sistemas de controle de cruzamentos que constituem uma malha, ao longo de uma via por exemplo, podem ser classificados em:

- **Sistema Simultâneo:** todos os semáforos ao longo de uma avenida exibem a mesma cor ao mesmo tempo e a duração do ciclo é idêntica para todos os cruzamentos. Esse sistema oferece melhores resultados quando as quadras são curtas ou quando as vias suportarem altas velocidades.
- **Sistema Alternado:** um grupo (ou seqüência) de sinais estará vermelho, o próximo grupo verde, e assim por diante, ao longo de uma via.
- **Sistema Progressivo:** cruzamentos sucessivos terão uma mesma duração de ciclo, porém a duração das fases verde e vermelho podem ser variadas para melhor satisfazer os requisitos de cada cruzamento. A temporização de um semáforo relativo ao semáforo seguinte é ajustado de tal modo a permitir um movimento contínuo de veículos ao longo da rodovia (onda verde).

Quando se trata de outros tipos de arranjo, não são usadas classificações, pois cada caso é um caso.

## 2.4. Desempenho de Cruzamentos Controlados

Em 1958, Webster (Road Research Laboratory - Inglaterra) desenvolveu uma abrangente análise de intersecções controladas (Webster, 1958). Ao trabalhar com tráfegos aleatórios, desenvolveu equações, nas quais o atraso médio por veículo e atraso médio total podem ser obtidos, em função do ciclo, da proporção de verde do mesmo, do volume de tráfego por via e do grau de saturação da mesma.

O desempenho do veículo leva em consideração os seguintes fatores:

- quando um semáforo determina a fase verde para uma determinada via, o movimento das filas não é iniciado instantaneamente; existe um tempo para o primeiro veículo se por em movimento que é o tempo de reação do motorista e um tempo de *headway* para os próximos veículos, segundo a Tabela 2.1 abaixo:

Posição do veículo	Tempo para entrar no cruzamento (segundos)
1	3.8
2	3.1
3	2.7
4	2.4
5	2.2
6	2.1
...	...
n	2.1

**Tabela 2.1: Tempo para os veículos entrarem no cruzamento**

- veículos comerciais têm comprimento maior e uma habilidade limitada de aceleração e manobras, dependendo do seu tamanho, da inclinação da via, da sua posição na fila, etc.
- veículos que fazem alguma conversão para a direita ou para a esquerda demoram mais para atravessar um cruzamento, dependendo do ângulo da conversão, da velocidade de aproximação do cruzamento, etc.

Em geral, usa-se uma **unidade padrão de veículos**, o que consiste em elevar o número real de veículos a fim de refletir os atrasos devidos aos fluxos de conversão e veículos comerciais, segundo a seguinte convenção:

- veículos comerciais correspondem de 1 a 5 unidades padrão;
- veículos que farão conversão correspondem de 1 a 2 unidades padrão.

Para analisar o desempenho de cruzamentos controlados são considerados:

- **Atraso Médio** sofrido por um veículo ao passar por um cruzamento pela  $j$ -ésima via durante a  $i$ -ésima fase, que é dado por:

$$d_j = \frac{C(I - \lambda_i)^2}{2(I - \lambda_i x_j)} + \frac{x_j^2}{2V_j(I - x_j)} - 0.65 \left( \frac{C}{V_j^2} \right)^{1/3} x_j^{(2+5\lambda_i)} \quad (2.04)$$

onde

$d_j$  = atraso médio por veículo na  $j$ -ésima via durante a  $i$ -ésima fase (em segundos);

$C$  = duração do ciclo (em segundos);

$\lambda_i$  = proporção de verde efetivo no ciclo total durante a  $i$ -ésima fase;

$V_j$  = volume real na  $j$ -ésima via, durante a  $i$ -ésima fase (em veículos/faixa/segundo);

$x_j$  = grau de saturação da  $j$ -ésima via - razão entre o fluxo total e o fluxo máximo que pode passar pelo cruzamento por esta via ( $V_j/\lambda_i S$ );

sendo

$S$  = fluxo de saturação: veículos/faixa/segundo (1/h);

e

$h$  = mínimo headway entre veículos no fluxo máximo, corresponde a 2.0 ou 2.1 segundos.

Para propósitos computacionais, a equação (2.04) pode ser escrita como:

$$d_j = \left( CA + \frac{B}{V_j} \right) \cdot \frac{100 - F}{100} \quad (1.05)$$

onde

**A**, **B** e **F** são valores calculados e tabelados por Webster, para facilitar e minimizar o processamento computacional.

• **O Tamanho das Filas Acumuladas:** (durante os estados em vermelho) pode ser aproximado por:

$$n_j = \frac{V_j R_i}{2} + V_j d_j \quad (2.06a)$$

ou

$$n_j = V_j R_i \quad (2.06b)$$

o que for o maior, onde:

$n_j$  = número médio de veículos esperando na fila na  $j$ -ésima faixa no início do período de verde;

$V_j$  = razão real do fluxo na  $j$ -ésima faixa (veículos/faixa/segundo);

$R_i$  =  $i$ -ésima fase em vermelho (em segundos);

$d_j$  = atraso médio por veículo na  $j$ -ésima faixa (em segundos).

• **Probabilidade do veículo passar pelo Cruzamento durante o primeiro verde:** se um veículo não consegue passar pelo cruzamento durante o primeiro estado verde para sua via, o motorista tende a ficar irritado e além disso, ocorre um acúmulo sucessivo de veículos, ocasionando longas filas, justificando assim a importância deste fator de desempenho.

A probabilidade de um veículo atravessar o cruzamento no primeiro verde pode ser calculada da seguinte maneira:

• Assume-se que as chegadas de veículos no cruzamento possuem Distribuição de Poisson;

• Calcula-se o número máximo de veículos que podem passar pela intersecção durante o tempo efetivo de verde;

• Usando a Probabilidade Acumulada de Poisson e o fluxo real de uma via por ciclo, determina-se a probabilidade associada com o número de chegadas durante o todo o ciclo como sendo igual ou menor que o número máximo de veículos que podem passar durante o verde efetivo.

## 2.5. Sistemas Convencionais para Controle de Tráfego

A maneira mais simples e mais utilizada atualmente para o controle de semáforos é a determinação prévia de cada fase e do ciclo total através de dados estatísticos. Estes são os chamados Semáforos de Ciclo Fixo.

Em algumas cidades existem sistemas mais avançados que consistem na divisão do dia em diversos períodos de acordo com o fluxo em cada via. Neste caso, são feitas estatísticas de cada um desses períodos e seus respectivos ciclos. Assim, os semáforos são de ciclos fixos mas que variam ao longo do dia, ou seja, possuem vários **planos** de ciclos.

Quando Webster (Webster, 1958) desenvolveu suas equações para medida de desempenho de semáforos, também desenvolveu modelos analíticos para calcular um ciclo ótimo que minimiza o atraso total que a intersecção causa. Estes modelos têm como parâmetros os fluxos de cada uma das vias. Este método para determinação dos tempos dos ciclos obtido através do estudo de simulações, proposto por Webster, constitui-se dos seguintes passos:

1. determinação do tempo de amarelo:

$$t_a = t_d + \frac{U}{2a_2} + \frac{W + L}{U} \quad (2.07)$$

onde:

$t_a$  = tempo de amarelo (em segundos);

$t_d$  = tempo de reação e de tomada de decisão do motorista (em segundos);

$U$  = velocidade de aproximação do veículo (m/s);

$W$  = largura do cruzamento a ser atravessado (metros);

$L$  = comprimento do veículo (metros);

$a_2$  = razão de desaceleração ( $m/s^2$ ).

2. consideração do desempenho do veículo: fase onde cada veículo é transformado em veículo padrão, segundo as convenções já determinadas.

3. determinação da proporção do tempo de verde: antes que a duração do ciclo total seja determinada, cada uma das fases verdes devem ser calculadas. O tempo total de verde disponível para o movimento de veículos é dado pelo ciclo total menos o tempo perdido. Este tempo perdido é devido ao tempo gasto para colocar a fila de veículos em movimento e também ao final do período de amarelo, enquanto se espera que os veículos liberem o cruzamento. Assim, para cada fase tem-se:

$$k = k_1 + k_2 \quad (2.08)$$

onde:

$k$  = tempo total perdido (segundos);

$k_1$  = tempo perdido para colocar a fila em movimento - aproximadamente 3.7 segundos por fase;

$k_2$  = tempo perdido enquanto o último veículo passa pelo cruzamento, depende da velocidade de aproximação e do comprimento dos veículos e da largura do cruzamento - varia de 1 a 2 segundos por fase.

Em geral, o tempo de verde efetivo é dado por:

$$G_E = C - \sum_{i=1}^p k_i \quad (2.09)$$

onde:

$G_E$  = tempo total de verde efetivo (segundos);

$k_i$  = tempo total perdido na fase  $i$  (segundos);

$p$  = número de fases;

$C$  = ciclo total (segundos).

O tempo total de verde efetivo para movimentação de veículos pode ser distribuídos entre as fases, proporcionalmente ao volume projetado de veículos/via no cruzamento - em geral, considera-se a faixa mais saturada para cada fase, sendo que o amarelo faz parte deste tempo.

Tem-se constatado, empiricamente, que quando uma fase tem um volume de veículos significativamente maior, consegue-se reduzir o atraso total do cruzamento, aumentando-se ligeiramente a proporção da fase verde em favor desta via.

A distribuição proporcional de verde efetivo, incluindo o tempo amarelo, pode ser obtido da seguinte maneira:

$$G_i = \frac{DV_i}{DV} \cdot G_E + K_i \quad (2.10)$$

onde:

$G_i$  = duração de verde e amarelo durante a  $i$ -ésima fase (segundos);

$DV_i$  = volume projetado durante a  $i$ -ésima fase;

$DV$  = somatória dos volumes projetados durante todas as fases, isto é:

$$DV = \sum_{i=1}^p DV_i \quad (2.11)$$

Além disso, para se determinar a fase verde real, é necessário somar o tempo perdido.

4. a determinação do atraso médio;
5. a determinação das filas médias;
6. a determinação da probabilidade dos veículos passarem pelo cruzamento durante a primeira fase verde.

Sendo assim, o ciclo ótimo que minimiza o atraso médio no cruzamento é dado por:

$$C_0 = \frac{1.5k + 5}{1 - y} \quad (2.12)$$

onde:

$C_0$  = duração do ciclo ótimo (segundos);

$k$  = tempo perdido em todas as fases;

$y$  = soma das razões de fluxo crítico por faixa pelo fluxo de saturação:

$$y = \sum_{i=1}^p \frac{DV_i}{s} \quad (2.13)$$

Em sistemas mais simples, estes cálculos são feitos uma única vez para a determinação de um único ciclo que funciona ao longo de um dia, durante todos dias. Os sistemas de vários planos envolvem todos estes cálculos para cada plano que é acionado durante o dia, o que também pode variar durante a semana, ou em dias não normais, feriados, por exemplo.

A grande vantagem destes sistemas é a simplicidade e facilidade de implementação, assim como o baixo custo. Porém se tornam obsoletos à medida que as condições de tráfego variam, dependendo do dia e da hora de ação. Além disso, os semáforos de vários planos exigem revisões periódicas para a sua atualização.

## 2.6. Sistemas Avançados para Controle de Tráfego

Baseado na necessidade de responder prontamente às variações de tráfego, várias técnicas vêm sendo propostas para resolver o problema em cruzamentos de vias urbanas, sendo que algumas delas ainda se encontram em fase de estudo.

### 2.6.1. Sistemas Hierárquicos de Controle

Este esquema de controle *on-line* proposto, por Khalili (1985), leva em consideração os seguintes critérios:

- atraso médio sofrido pelos veículos;
- número de paradas durante o trajeto;
- tempo de espera médio numa fila;
- consumo de combustível;
- taxa de emissão de gases poluentes.

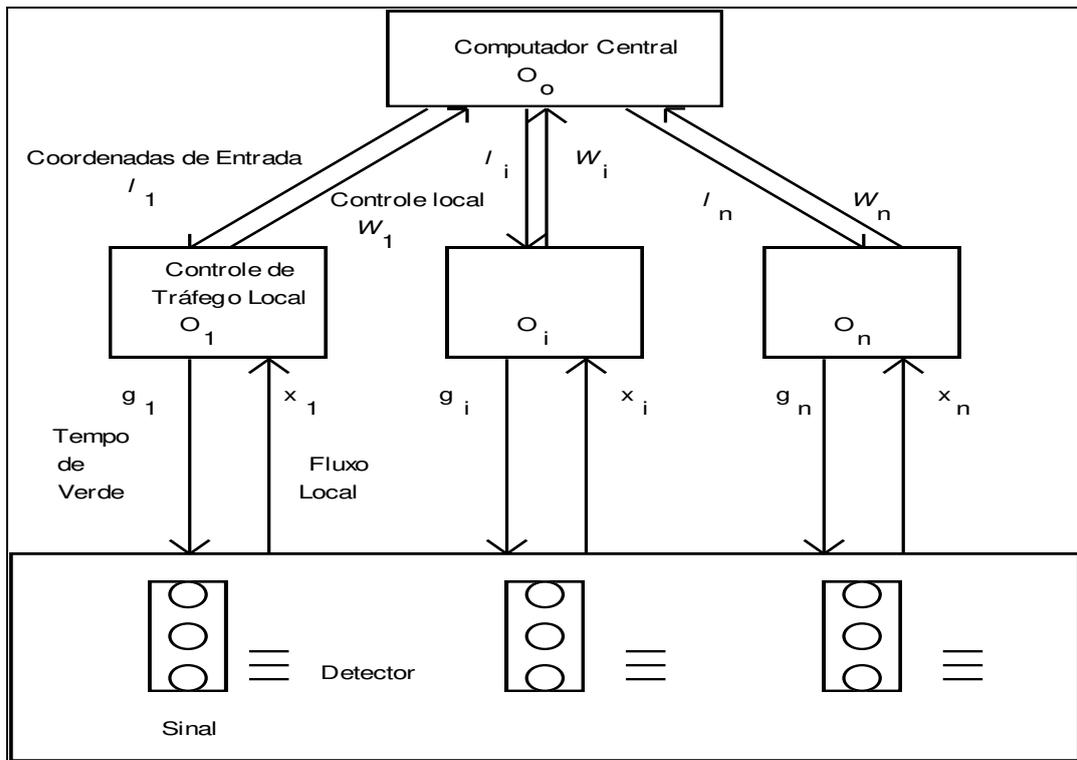
Cada um desses critérios é dado por uma função do volume de tráfego, dentro de uma rede de junções.

Ao estabelecer um ciclo ótimo que minimize o atraso, não necessariamente se obtém um ciclo que minimiza o consumo de combustível, ou qualquer outro dos objetivos, ou seja, prioriza-se um deles.

A proposta tem como objetivo a descrição de um *hardware* e a apresentação de um algoritmo que possua a flexibilidade de selecionar um objetivo principal para cada situação.

Um dos pontos interessantes desse trabalho é o uso de estruturas hierárquicas de controle, cuja teoria é descrita por Mesarovic *et all* (1970).

A metodologia consiste em decompor o sistema total em vários subsistemas coordenados, onde cada um deles é otimizado, promovendo a otimização global. No caso, a arquitetura utilizada possui dois níveis de decisão, figura 2.6:



**Figura 2.6: Arquitetura do Sistema Hierárquico de Controle**

O nível mais alto do sistema se concentra no computador central, sendo os seus subordinados os controles locais.

O computador central tem o poder de decisão sobre cada um dos controles locais, no que se refere aos tempos de ciclo, *offset* e trocas. Já os controles locais têm a função de armazenar as informações sobre os fluxos e passá-las ao computador central, ou seja, a interação é vertical e acontece da seguinte maneira: de cima para baixo tem-se as entradas para coordenação, e de baixo para cima, as entradas para controle.

Para todas as coordenadas de entrada e informações vindas dos detectores, há um conjunto de decisões para ser avaliado.

Como o algoritmo desenvolvido se apresenta para uma rede de junções ou cruzamentos, existe um atraso entre as intersecções, que é o tempo de viagem entre um cruzamento e outro. Isto favorece o tempo para predição.

Para que a interação seja produtiva, ela deve seguir o algoritmo proposto, que por sua vez deve seguir algumas regras bem definidas:

- O Tempo de Ciclo Ótimo é escolhido para atender à demanda de tráfego e às entradas de coordenação.
- O Tempo de Offset Ótimo é definido como a diferença entre o inícios do tempo de verde de duas junções seguidas e é dependente da distância entre elas, da velocidade de aproximação e das condições de tráfego.
- A predição é feita através de dados estatísticos, que dependem do tamanho das ruas, além disso, ela pode incorrer em pequenos erros devido às conversões que não são previsíveis.
- A determinação do Tempo de Verde Ótimo é feita de maneira a minimizar uma das funções objetivo.

## O algoritmo:

Detectores ← entradas

Para cada cruzamento

    Para cada via do cruzamento

        Calcula-se o grau de saturação

Para cada junção da rede

    Avalia-se o tempo de ciclo de maneira *on-line*

    Tempo de ciclo ótimo ← Tempo de ciclo total /  $k$ , ( $k \in \mathbb{Z}$ )

Rede é dividida em sub-áreas (de acordo como tempo das junções)

Seleciona-se o critério de otimização (de acordo com o grau de saturação da rede)

Para cada via da rede

    Avalia-se o tempo de *offset* (*on-line*)

    Se nenhuma mudança brusca significativa ocorrer

        Tempo de *offset* ótimo ← média do tempo de *offset* ao longo da rede

    Para cada junção que compõe uma sub-área

        Transmite-se o vetor de coordenadas (ciclo ótimo, *offset* ótimo, etc)

Cada junção que recebeu as coordenadas

    Entra em fase verde

    Se tempo de verde mínimo ( $G_{\min}$ ) = fim

        Novas medidas de fluxo são tomadas

        Coordenadas futuras são previstas e alocadas ao controle local

        Para cada uma das vias que se aproximam do cruzamento

            São tomadas decisões sobre o tráfego

            Tempos de cada fase são calculados e aplicados.

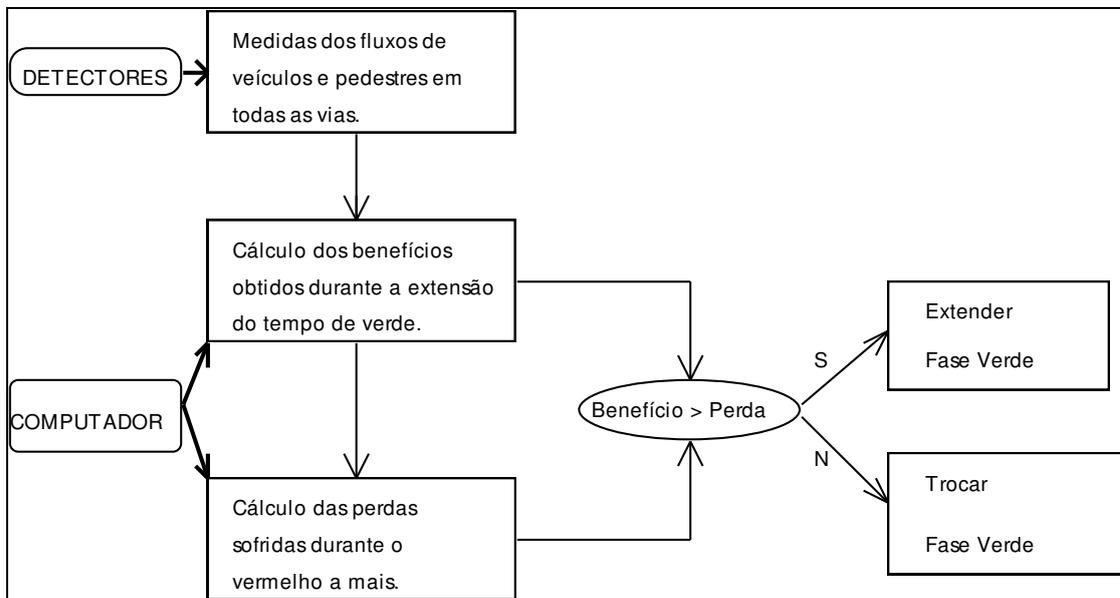
Ao final de  $k$  ciclos, o método se repete, através de um procedimento que ainda não está disponível.

A grande vantagem do método é a variedade de critérios que podem ser aplicados à otimização, para cada situação, além da independência para cada sub-área, que pode ter seus próprios objetivos e critérios. Porém a quantidade de cálculos exigida é grande, sendo portanto um método de alto custo de implementação.

## 2.6.2. Controle Ótimo de Intersecções Isoladas

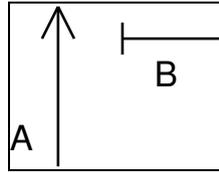
Este sistema proposto por Bang (1976), consiste na otimização de sistemas *on-line*, os quais não possuíam, até então, qualquer tipo de procedimento que agisse nesse sentido. Ele é baseado na idéia de Miller (1963), que realizou vários estudos na área e propôs uma estratégia fundamentada no critério de minimização do atraso total sofrido por um veículo. Para essa estratégia, a decisão é tomada a fim de estender ou não uma fase verde para uma determinada via, e esta é feita em intervalos regulares, tendo como orientação uma função de controle. Esta função representa a diferença entre o ganho que os veículos que passam pelo verde fornecido a mais recebem e a perda que os veículos que ficam parados no vermelho a mais sofrem.

O método foi batizado de *TOL* e funciona da seguinte maneira: a extensão para o tempo de verde é calculada em intervalos regulares  $h$ , avaliando-se a função de controle  $\phi$  que representa a diferença descrita acima. O método resume-se no seguinte esquema, conforme figura 2.7:



**Figura 2.7: Esquema do Método TOL**

Um exemplo da função de controle para o caso simples com apenas duas vias de aproximação, ambas com mão única, é dado a seguir:



Neste caso , A tem o estado verde, e sendo assim, a decisão será estender ou não o verde para A.

**Figura 2.8: Cruzamento exemplo**

A função  $\phi$  é dada por :

$$\phi_A = r_A(a_v \cdot \delta_{Av} + a_b \cdot \delta_{Ab} + a_p \cdot \delta_{Ap}) + b_v \cdot \delta_{Av} + b_b \cdot \delta_{Ab} - h(a_v \cdot n_{Bv} + a_b \cdot n_{Bb} + a_p \cdot n_{Bp}) - (b_v \cdot \Delta n_{Bv} + b_b \cdot \Delta n_{Bb})$$

onde:

$r_A$  = tempo de demora até a via A obter estado verde novamente se este se encerrasse imediatamente;

$a$  = custo do atraso por segundo;

$\delta$  = número de veículos e pedestres que poderiam passar pelo cruzamento se o verde fosse estendido em  $h$  segundos;

$b$  = custo de parada;

$h$  = intervalo entre os cálculos da função de controle;

$n$  = número de veículos nas filas em vermelho, se a fase corrente fosse estendida;

$\Delta n$  = número de veículos extras que serão obrigados a parar se o verde for estendido por  $h$  segundos;

$v$  = veículos;

$b$  = ônibus;

$p$  = pedestres.

A fase A é então estendida até que  $\Phi_A < 0$ , sujeito, é claro, à restrição de tempo máximo de verde. E assim, cada uma das fases tem uma função  $\Phi$ .

O método não garante que exista uma otimização global, uma vez que ele é baseado em otimização por partes, porém é um avanço com relação aos outros tipos de sistemas atuados, pois estes não envolvem qualquer tipo de otimização.

Outro ponto a considerar é o número de detectores necessários para a obtenção dos dados, sendo que para cada uma das variáveis, é preciso identificar sua origem: veículos, ônibus ou pedestres. Além disso, a eficiência do método depende da precisão das informações fornecidas pelos detectores.

Depois de obtidos os resultados das simulações e de um estudo de caso realizados no trabalho de Bang (1976), pode-se constatar que o método fornece melhores resultados que os controles de tempo fixo e os controle atuados comuns, porém a eficiência do método cai muito quando o tamanho do cruzamento aumenta de 1/1 para 2/2.

### 2.6.3. Controle Adaptativo e Redes Neurais

Uma possível estratégia de controle *on-line* para intersecções de vias urbanas consiste em variar os tempos de verde para cada fase, para cada ciclo, como uma função da demanda de tráfego existente. Como já vimos, este não é um problema trivial, pois trata de relações não lineares.

Além disso, um modelo de controle *on-line* usa informações de *feedback* de tempos em tempos, afim de ajustar as estratégias de acordo com a variação de fluxos. O custo de se obter e armazenar estas informações continuamente torna-se uma barreira para este tipo de método. Este modelo proposto por Barnard (1992), utiliza redes neurais como ferramenta para armazenar estas informações.

Redes Neurais têm a capacidade de aprender, e podem alterar o seu comportamento de acordo com as entradas de novas informações: quando é dado para uma rede neural um conjunto de entradas e, para estas, um conjunto de saídas desejadas, ela pode adaptar-se de maneira a dar as respostas esperadas. Esta é a fase de treinamento. Quando a rede é apresentada a um novo conjunto de entradas, ela calcula uma nova saída, baseando-se no seu aprendizado. O que torna possível uma resposta para cada entrada é a capacidade de interpolação da rede. Além disso, tem a capacidade de distinguir quais são as entradas mais relevantes, significando que as redes podem reconhecer as propriedades mais importantes que classificam uma determinada entrada.

Uma fase importante na implementação do modelo consiste na escolha das entradas e saídas.

- **As entradas:** densidade do fluxo, que é o número de veículos que passa sobre cada uma das estações de contagem existentes em cada uma das vias que chegam ao cruzamento.

Para o experimento realizado por Barnard, as medidas foram tomadas por apenas dez dias, uma vez que o objetivo do trabalho foi demonstrar a factibilidade do método e não a sua implementação real, pois muito mais dados seriam necessários para o treinamento real de uma rede neural.

- **Os dados para aprendizagem:** neste ponto existe uma dúvida sobre quais os dados que devem ser utilizados na aprendizagem. Sabendo-se que, quando à rede são apresentadas diferentes entradas que devem gerar saídas iguais, ela tende a produzir a mesma saída para valores intermediários, ou seja, uma média das entradas. Quando ela é treinada com dados de poucos dias, ela tende a aprender uma estratégia para a média destes dias, o que é indesejável, pois assim ela não saberia lidar com novas condições de tráfego como um congestionamento, por exemplo. Para resolver este problema em particular, foi escolhido um dia representativo, o dia com maior fluxo de veículos.

- **A saída:** as saídas desejadas são planos reais existentes para o cruzamento estudado.

Neste ponto existe outra dúvida: como uma rede pode melhorar o sistema convencional, se ela é treinada a partir dele?

A resposta é simples: os planos convencionais levam em consideração demandas de tráfego em períodos determinados, ou seja, vários planos fixos se alternam durante determinados períodos do dia. A rede não usa o tempo como entrada, apenas as condições de tráfego para decidir a estratégia de controle. Este tipo de entrada favorece o desempenho da rede, pois assegura que esta seja capaz de trabalhar com as possíveis variações das condições de tráfego.

Além dos pontos considerados acima, é necessário considerar o seguinte:

- **Implementação:** O processo de treinamento requer bastante tempo de processamento, devido à grande variação de tráfego que ocorre, não só ao longo de um dia, mas também ao longo dos dias da semana. Além disso, um hardware adequado seria necessário.
- **Condições de Contorno:** é necessário decidir por exemplo, o máximo valor de espera numa fase de vermelho e assegurar que o tempo de vermelho real não exceda tal valor. Ou seja, é necessário determinar as restrições de modo a permitir que o fluxo seja normal, mesmo sob condições anormais, como por exemplo, um acidente.
- **Tipos de dados para entrada:** utilizar somente os dados sobre o fluxo pode não ser suficiente para assegurar o sucesso da estratégia de controle. É claro que mais informações acarretariam custos adicionais, mas tornariam o sistema capaz de adaptar-se continuamente e melhorar cada vez mais o seu desempenho. A informação adicional poderia ser, por exemplo, o número de veículos parados numa fila, sendo que uma fila muito grande seria um sinal de que é preciso mudar a fase, caso contrário mantém-se a fase corrente.
- **Treinamento contínuo:** como as características de um fluxo de veículos variam sempre, é necessário que a rede seja treinada constantemente, e uma vez que, enquanto sendo treinada, a rede não é capaz de produzir resultados, seriam necessárias duas redes por controle. Assim, uma estaria em treinamento enquanto que a outra estaria controlando propriamente dito. No momento em que a rede em treinamento estiver com margem de erro menor do que a atuante, os papéis se invertem, recomeçando o ciclo.
- **Sincronismo:** o estudo feito até agora envolve apenas cruzamentos isolados, o que significa que nada com relação ao sincronismo foi acrescentado. O estudo feito mostra apenas que é possível utilizar redes neurais como ferramenta para controle de tráfego, porém não mostrou ainda que esta seja a melhor estratégia. Além disso, trata-se de um recurso, pelo menos por enquanto, bastante caro.

## 2.6.4. Uma Estratégia Específica para o Descongestionamento de Áreas Urbanas

O planejamento do controle de sinais durante períodos de pico é um dos problemas mais sérios quando se fala em tráfego urbano, devido ao rápido crescimento dos fluxos de chegada os quais não podem ser esvaziados mesmo utilizando-se a capacidade máxima das vias de saída. Este desequilíbrio entre os fluxos de chegada e de vazão reflete no crescimento descontrolado das filas que congestionam toda a área, podendo durar mais que dez minutos. Canuto *et all* propuseram em 1984 um plano exclusivo para a dessaturação de cruzamentos em horas de picos. Neste caso, o objetivo não é só maximizar o fluxo de vazão mas também minimizar o tempo perdido em filas. Uma vez que o crescimento e a dissipação das filas são fenômenos dinâmicos, a minimização do atraso é um problema de otimização dinâmica durante todo o período de pico. Este é um problema bastante complexo devido a duas razões: a primeira o número de variáveis de controle é muito grande, mesmo para malhas pequenas; a segunda, as médias de veículos passantes dependem do número de faixas e do tamanho das filas nelas acumuladas. Portanto, o problema consiste de dois fatores, um dinâmico e o outro estático.

A estratégia descrita a seguir trata a questão considerando uma única intersecção com várias vias de chegada e saída com fluxos aleatórios. A função de controle é dada pelo tempo de espera acumulado pelos veículos durante o período de saturação, sendo que este problema pertence a uma classe bem maior de problemas de minimização, o que permite obter o menor tempo para o descongestionamento, antes de aplicar o controle ótimo.

- **O Modelo**

Para definir o modelo matemático de uma intersecção de várias vias saturadas ou congestionadas, considera-se o grafo direto dos fluxos de conversão, simbolizado por

$$N \equiv \langle L, A, \Delta \rangle \quad (2.14)$$

onde  $L$  é conjunto de nós que representa o conjunto de vias interligadas à intersecção;  $A$  é o conjunto de arcos que representa o conjunto de pares de vias de chegada e de vazão consecutivas e  $\Delta$  é o mapeamento de incidência arco-nó.

Para cada fase do sinal, um conjunto de grupos de operadores de fase  $\{\Psi_l, l = 1, \dots, N\}$  é definido de maneira que

$$G_l = \Psi_l(A) \quad (1.15)$$

represente o conjunto do  $n_l$ -elemento do  $l$ -ésimo arco de fase. Além disso, um operador de origem destino é associado a cada padrão de demanda, de tal maneira que o vetor de demanda correspondente ao vetor arco  $A$  possa ser escrito como

$$Q = \Xi (A) \quad (2.16)$$

- **O Modelo Dinâmico de Tráfego:**

A condição de estado de fluxo no tempo  $t$ , para cada via  $i \in A$ , é definida como a diferença entre os fluxos de chegada e de vazão.

$$x_i(t) = q_i(t) - s_i u_i(t) \quad (2.17)$$

com a restrição

$$x_i(t) \geq 0, \quad (2.18)$$

onde

$q_i(t) \in Q$  e  $u_i(t)$  é a parte do tempo realmente usada para a vazão de veículos e  $s_i$  é o fluxo de saturação.

Os tempos reais de cada via estão sujeitos a restrições que dependem de cada fase. Sendo  $g_l(t)$  a porção de verde referente à  $l$ -ésima fase, então

$$\bar{u} \geq g_l(t) \geq \max(\max_{j \in G_l} \{u_j(t)\}, \underline{u}) \quad (2.19)$$

para todo  $l = 1, \dots, N$ , onde  $\underline{u}$  e  $\bar{u}$  são os limites admissíveis mínimo e máximo respectivamente do tempo de verde.

Além disso, cada porção de verde deve satisfazer a restrição referente ao verde total da intersecção, dada por

$$\sum_{i=1}^N g_i(t) \leq \delta, \quad (2.20)$$

onde

$\delta$  é o total de verde disponível para a intersecção.

Para a intersecção descrita pela equação (2.17) e pelas inequações (2.18)-(2.20), pode-se definir as seguintes condições de saturação.

**Diz-se que uma intersecção está sub-saturada no intervalo  $(t_1, t_2)$ , se  $x_i(t) = 0, \forall t \in (t_1, t_2), \forall i \in A$ .**

Para esta condição tem-se a seguinte propriedade:

- uma intersecção se mantém sub-saturada  $\forall \tau \geq t_1$ , se e somente se o padrão de sinal é tal que para cada via  $i \in A$ ,

$$\int_{t_j}^{\tau} v_i(t) dt \leq \int_{t_j}^{\tau} u_i(t) dt \quad (2.21)$$

onde

$v_i(t) = \frac{q_i(t)}{s_i}$  denota a razão de vazão necessária no tempo  $t$  e  $u_i(t)$  satisfaz as restrições (2.19) e (2.20).

### • Estratégias de Descongestionamento

Considerando as demandas de tráfego onde cada fluxo  $q_i(t)$  é ambos persistente, isto é,

$$v_i(t) \geq \underline{u}, \forall t \quad (2.22)$$

e monotonicamente decrescente, isto é,

$$q_i(t) \leq \bar{q}_i + \gamma e^{-\alpha t}, \quad (2.23)$$

onde

$\bar{q}_i = \lim_{t \rightarrow \infty} q_i(t)$ , tem-se as condições

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} v_i(t) = \bar{u}_i < \bar{u} \\ \sum_{l=1}^N \max_{j \in G_l} \{u_j\} = \bar{\delta} - c \end{aligned} \quad (2.24)$$

onde

$c > 0$  é uma constante pequena.

Estas condições são necessárias e suficientes para o descongestionamento de uma intersecção dentro de um intervalo finito de tempo. Elas mostram que a saturação necessita de serviços de vazão que não podem ser definidos pelas condições dos fluxos de chegada e saída, mas que devem ser selecionados para forçar a eliminação das filas num tempo mínimo.

Este tipo de controle pode ser resolvido primeiro avaliando-se o tempo de dessaturação mínimo  $H^*$  e segundo selecionando a razão de vazão que assegura o tempo de espera mínimo no horizonte  $H^*$ .

Assim sendo, tem-se que para fluxos de chegadas que satisfazem (2.22) e (2.23), o tempo mínimo de dessaturação  $H^*$  é tal que

$$\sum_{l=1}^N \max_{j \in G_l} \int_0^{H^*} (v_j(t) - u) dt = (\bar{v} - v) H^* \quad (2.25)$$

Esta equação mostra que  $H^*$  não depende de qualquer regra de controle, mas exige somente que o padrão das fases assegure a eficiência total da intersecção. Para selecionar uma configuração particular de razão de vazões, precisa-se do total do tempo de espera, que é dado por

$$W(H^*) = \sum_{i \in A} \int_0^{H^*} x_i(t) dt, \quad (2.26)$$

Sendo assim, o problema fica com a seguinte formulação

$$\min_{u_i(t) \in U} W(H^*), \text{ s.a., } \forall t \begin{cases} x_i(t) = q_i(t) - s_i u_i(t) \in [0, H^*] \text{ e } i \in A, \\ x_i(H^*) = 0 \\ x_i(0) = \bar{x}_i \\ x_i(t) \geq 0 \end{cases}$$

enquanto que o conjunto de controles admissíveis  $V$  é definido pelas restrições (2.19) e (2.20).

Se for introduzida uma aproximação por tempo discreto da função objetivo e da equação (2.17), este problema de controle para descongestionamento pode ser reduzido a uma seqüência de problemas de otimização estáticos:

$$W(H^*) = \sum_{k=1}^{NH} \sum_{i \in A} \epsilon x_i(k), H = NH\epsilon \quad (2.27)$$

com

$$x_i(k+1) = x_i(k) + q_i(k)\epsilon - s_i u_i(k)\epsilon. \quad (2.28)$$

- Cada problema de otimização estática pode ser definido da seguinte maneira:

Para cada estágio  $k$ ,

$$\begin{aligned} & \max_{u_i} \sum_{i \in A} s_i u_i \\ & \left\{ \begin{array}{l} u \leq u_i \leq \min \left( \bar{u}, \frac{x_i + q_i}{s_i} \right) \\ \sum_{j \in G_1}^N \max \{u_j\} \leq \delta \end{array} \right. \\ \text{s.a.} & \end{aligned}$$

onde:

$$u_i = u_i(k);$$

$$x_i = x_i(k);$$

$$q_i = q_i(k);$$

- **Algoritmo de Resolução**

P1. Baseado na proporção de vazão necessária

$$\bar{u}_i = \min\left(\bar{u}, \frac{x_i / \varepsilon + q_i}{s_i}\right), \forall i \in A \quad (2.29)$$

acrescente a seguinte ordenação:

- razão de vazão da l-ésima fase ordenada
- seqüência de subgrupo dentro da l-ésima fase ordenada
- seqüência de fluxo de saturação da l-ésima fase ordenada
- seqüência de fluxo de saturação da intersecção ordenada

P2. Determina a razão de vazão, que depende de ordenação das vias

Este algoritmo empregado a cada passo  $k$  é realmente uma lei de *feedback* ótima para a intersecção na presença de fluxos de chegadas persistentes. Esta lei satisfaz naturalmente a restrição de tempo de mínimo de dessaturação.

Esta estratégia tem a vantagem de poder ser calculada até sem a ajuda de um computador para o caso de uma intersecção de apenas duas vias concorrentes, desde que a condição de fluxo persistente seja garantida.

Porém, é importante que se leve em consideração o profundo grau teórico do trabalho, com propriedades e teoremas bastante complexos.

### 2.6.5. Controle Baseado em Lógica Nebulosa

A partir de experimentos utilizando a Lógica Nebulosa (Zadeh, 1965) aplicada ao projeto de controladores para problemas dinâmicos, processos industriais, além de outros (Mamdani, 1974) e (Mamdani e King, 1975), Pappis e Mamdani (1977) propuseram um tipo de controle para semáforos, atuados *on-line*, baseados nesta lógica, sendo que para este trabalho, considera-se uma única junção.

Um algoritmo que utiliza variáveis lingüísticas e que é capaz de lidar com situações que exigem tomadas de decisões contínuas é sintetizado e para isso partiu-se de uma base de conhecimento e um protocolo de instruções de controle usados por um operador humano.

O modelo é de um cruzamento de apenas duas vias com uma faixa de movimento cada uma e as chegadas dos veículos é uniformemente distribuída. O ciclo é dividido em duas fases: uma de verde efetivo e a outra de vermelho efetivo para uma das vias, sendo que para a outra o complementar é verdadeiro. Os veículos saem da fila a uma razão constante igual ao fluxo de saturação (3600 v/s) durante o verde efetivo. Não se considera fluxos de conversão.

Como se trata de um controlador atuado, este faz intervenções de períodos em períodos a fim de estender ou não o verde corrente. Neste caso o período é de 10 segundos, exceto na primeira de cada verde que é feita aos 7 segundos. As

informações sobre os fluxos que chegam ao cruzamento são tomadas pelos detectores que devem estar instalados antes dos sinais de trânsito, em cada uma das vias de maneira que a distância entre eles e as linhas de parada seja suficiente para que o controlador seja informado sobre as chegadas de veículos nas duas vias dentro dos próximos 11,5 segundos, sendo que o verde efetivo termina na metade dos 3 segundos de amarelo.

Quando um veículo  $i$  está passando pelos detectores, seu registro é feito da seguinte maneira: sua velocidade  $v_i$  é calculada e assume-se que esta se mantém até a chegada ao ponto crítico, que está a uma distância  $l$  metros do ponto de detecção. Seja

$$N_i = l/v_i - 1.5 \quad (2.30)$$

o tempo necessário para o veículo chegar a este ponto, o que significa que  $N_i$  indica a posição do veículo  $i$  no vetor de padrão de fluxo nos próximos 10 segundos. Sendo assim, os parâmetros de entrada para o controle são dois vetores atualizados continuamente, que correspondem as vias que chegam ao cruzamento.

Para chegar à síntese do controle, foi utilizada uma heurística, o que resultou num conjunto de regras com variáveis linguísticas e estas foram descritas sistematicamente através da teoria de controle nebuloso, assim como o processo de tomada de decisão.

As regras utilizadas são da forma:

Se	(Tempo de verde decorrido)	=	médio
e	(Chegadas na via em fase verde)	=	<i>maior que</i> médio
e	(Fila na via em fase vermelha)	=	média
então	(Extensão de verde)	=	média

ou

Se	(Tempo de verde decorrido)	=	longo
e	(Chegadas na via em fase verde)	=	<i>maior que</i> muitos
e	(Fila na via em fase vermelha)	=	<i>menor que</i> média
então	(Extensão de verde)	=	longa

ou...

onde os operadores *maior que* e *menor que* foram introduzidos para serem usados sempre que o grau de incerteza for muito alto.

No total, foram utilizadas 25 regras divididas em conjuntos de 5, de maneira que apenas um conjunto é acionado de cada vez, de acordo com o tempo de verde da fase decorrido, o que dá um máximo de 5 intervenções que podem acontecer no 7<sup>o</sup>, 17<sup>o</sup>, 27<sup>o</sup>, 37<sup>o</sup>, 47<sup>o</sup> segundos, sendo que o máximo de verde é de 57 segundos.

Dadas as entradas, é possível acionar o processo de tomada de decisão que para cada segundo, considera os próximos 10 segundos para verificar quantos veículos passariam pelo ponto crítico e quantos se somariam à fila. O processo de tomada de decisão nebuloso faz com que a ação selecionada seja aquela que minimiza o grau de incerteza: para cada segundo toma-se o máximo mínimo de acordo com as regras normais de inferência. Se o maior valor obtido for menor que 0.5, nenhuma extensão

é dada e a troca de fases é imediata; senão, toma-se o maior máximo obtido e a saída é a quantidade de segundos que corresponde a este valor.

Os resultados que foram obtidos, confrontando-se o desempenho que controles convencionais fornecem, mostram a vantagem do controlador nebuloso, e isto se deve à vários fatores: a distância considerável entre os detectores e o ponto crítico, à detecção do fluxo em ambas as vias e à implementação de regras obtidas a partir da análise de desempenho.

É importante notar que a teoria de conjuntos nebulosos oferece a possibilidade de modelar problemas utilizando regras com valores lingüísticos, o que permite sintetizar facilmente algoritmos de controle, mesmo para processos complicados.

Estratégias de controle aplicáveis a auto-estradas foram estudadas por Ngo *et all* (1991). O objetivo no caso, é controlar velocidades em auto-estradas para que o trânsito flua normalmente, afim de evitar congestionamentos, antes que a densidade de veículos se torne crítica, usando para tal a teoria de Controle Nebuloso.

Um dos grandes causadores de congestionamentos em auto-estradas é a grande diferença entre as velocidades dos veículos que seguem em cada uma das vias. Quando ocorre um distúrbio qualquer, tem-se um efeito dominó, que acaba causando engarrafamentos e eventualmente novas ondas de choques. Uma possível maneira de evitar tais consequências é impor velocidades homogêneas, através de quadros de advertência ao longo das rodovias.

A maior dificuldade de um trabalho deste tipo é sensibilizar os motoristas quanto à responsabilidade no trânsito, isto é, se a densidade do fluxo é baixa, naturalmente as velocidades tendem a ser bem altas ou vice-versa.

O que se propõe é um modelo de controlador nebuloso baseado em redes neurais de duas camadas; para isso, divide-se a estrada em seções, sendo que em cada uma delas, coloca-se um desses controladores, que devem monitorar as velocidades locais, utilizando como entradas, informações das condições gerais da rodovia, vindas de um computador central. Primeiramente, limitou-se a uma estrada com uma única faixa..

Controladores nebulosos são capazes de lidar com informações qualitativas (por exemplo, regras lingüísticas) enquanto que redes neurais são eficientes com dados quantitativos (medidas, por exemplo). A intenção é colocar juntas estas duas ferramentas afim de se obter um controlador capaz de trabalhar com todo tipo de informação. Além disso, está demonstrado (Kosko, 1992) e (Wang, 1992) que um sistema nebuloso é um aproximador universal para funções não lineares.

A rodovia é dividida em N seções, sendo que em cada uma destas toma-se as medidas da densidade de fluxo e da velocidade média. Cada controlador nebuloso local monitora uma dada seção e é monitorado por um controlador central. Este, por sua vez, é monitorado pela rede de controladores locais, sendo que em situações normais, cada controlador local trabalha independentemente, o que não ocorre em casos especiais.

Como o controlador nebuloso baseado em redes neurais utiliza um algoritmo do tipo *back propagation*, é necessário um simulador para a aprendizagem das características de um fluxo real de tráfego.

Uma grande vantagem de um controlador nebuloso baseado em redes neurais é que a estratégia de controle é computacionalmente simples e fácil de implementar e, além disso, novas informações podem ser incorporadas.

Quando se desenvolve um controlador para essa aplicação, deve-se considerar os limites de velocidade, uma vez que a segurança é o principal objetivo. Portanto, deve-se evitar, por exemplo, variações bruscas de velocidades entre as seções e entre os intervalos de tempos. No caso de baixas densidades de fluxo, o controlador quase não tem efeito. Neste caso, basta uma monitoração para o local.

## 2.7. Resumo

Foram introduzidos, neste capítulo, os conceitos básicos necessários à compreensão do problema tratado neste trabalho. Vários tipos de cruzamentos assim como dos vários tipos de estratégias de controle utilizados para os mesmos foram descritos.

Uma apresentação sobre os estudos realizados e desenvolvimentos abrangendo controladores tradicionais e sofisticados foi feita.

O próximo capítulo trata do sistema de controle desenvolvido como objeto deste trabalho, incluindo o ambiente de simulação utilizado.

## 3. SISTEMA NEBULOSO PARA CONTROLE DE TRÁFEGO

### 3.1. Introdução

A capacidade dos cruzamentos é, em geral, menor do que a capacidade das vias que chegam até ele. Portanto estes se constituem em gargalos de uma rede viária urbana.

Embora tenha havido avanços na área, em casos de congestionamento por exemplo, o ganho que essas novas tecnologias trouxeram é limitado. Esta limitação está em grande parte, na pré-determinação dos tempos máximos e mínimos para os ciclos de um semáforo. Além disso, a maioria das técnicas desenvolvidas até agora trata separadamente cada situação que pode ocorrer ao longo de um dia, no trânsito.

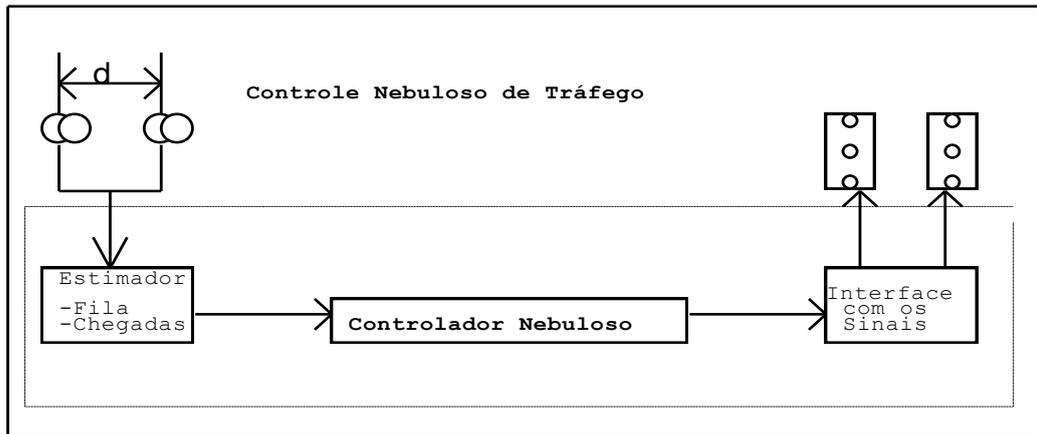
Um estudo recente realizado por Mahalel, (1991) mostra que o controle manual feito por um guarda de trânsito experiente é mais eficiente que um controle automático atuado em situações de congestionamento. Esta eficiência se deve, em parte, à sensibilidade do policial com relação às variações nas condições de tráfego.

Baseado neste resultado e nos outros descritos no capítulo anterior, este capítulo mostra, detalhadamente, como foi desenvolvido um novo controlador para intersecções de vias urbanas, que utiliza a teoria de controle nebuloso (Lee, 1990; Pedrycz, 1989), e uma estrutura hierárquica de supervisão (Favilla *et all*, 1992).

A Lógica Nebulosa foi escolhida como ferramenta porque é capaz de modelar problemas complexos assim como as decisões que devem ser tomadas, baseada no conhecimento especialista. Mais ainda, como utiliza variáveis lingüísticas, ela pode descrever o modelo e as ações tal qual um especialista o faria (Lee, 1990).

A Teoria de Controle Hierárquico é utilizada de maneira a identificar a situação global do cruzamento e dirigir as decisões de acordo com a mesma, sendo que para cada uma dessas situações, o controle envia informações a um módulo adaptador de universo que será descrito no próximo capítulo, afim de verificar qual é a intensidade de fluxo naquele momento.

O diagrama de blocos do sistema de controle nebuloso a ser desenvolvido é mostrado na figura 3.1.



**Figura 3.1: Diagrama de Blocos para o Controlador Nebuloso de Tráfego**

### 3.2. Desenvolvimento do Controlador Nebuloso

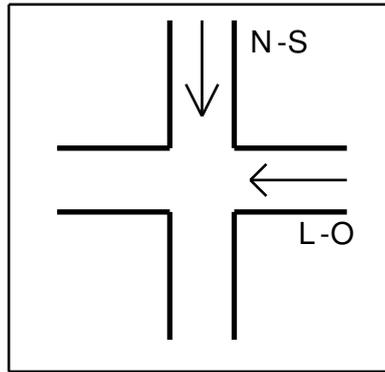
Para o desenvolvimento desta nova ferramenta, considerou-se o *hardware* para os sensores, disponível de acordo com os propósitos deste trabalho, ou seja, por se tratar de um controlador baseado em lógica nebulosa, as informações que os sensores fornecem não precisam ser exatas, basta que eles sejam capazes de apresentar uma estimativa apropriada dos dados relevantes de entrada.

Segundo Gault (1981), a posição ótima para os detectores é a 40m do ponto crítico (distância do cruzamento que uma vez alcançada pelo motorista, ele consegue atravessá-lo). Esta distância é suficiente para que, a cada intervenção, os dados estejam disponíveis para o que vai acontecer nos próximos 10 segundos, isto porque considera-se que os veículos deixam as filas a uma média igual ao fluxo de saturação, durante o período de verde efetivo (Robertson, 1979), o que está de acordo com as funções de pertinência usadas pelo controlador. Os sensores devem ser duplos para cada faixa e devem estar a uma distância  $d$  conhecida um do outro. Isto permite que o algoritmo estime as taxas de chegada, bem como as velocidades de aproximação e assim verificar se os carros que chegam têm condição de atravessar o cruzamento, ou vão se juntar na fila que vai se formar.

Embora este esquema não garanta precisão nas suas medidas, ele é suficiente para a estratégia de controle, que é capaz de trabalhar com informações imprecisas.

Um dos problemas que as ferramentas descritas anteriormente apresentaram foi a amarração entre as entradas e o tempo. Sendo assim, após analisá-las verificou-se que este é um dado irrelevante, isto é, para as entradas do novo controlador deveriam prevalecer somente as condições do tráfego naquele momento, sem se importar qual momento seria aquele, a saber, a fila que se forma na via em vermelho e o número de veículos que passam pela via em fase verde.

Numa primeira etapa, onde foram desenvolvidas as novas regras e conjuntos nebulosos (Favilla *et al*, 1992), utilizou-se um cruzamento simples de duas vias com mão única, como mostra a figura 3.2:



**Figura 3.2: Cruzamento utilizado para primeira etapa**

Considera-se que o ciclo para este cruzamento é dividido em dois períodos, um de verde efetivo e outro de vermelho efetivo, e não há fluxos de conversão.

Para viabilizar o trabalho construiu-se um simulador de cruzamentos que a cada unidade de tempo, no caso, um segundo, gera um número pseudo-aleatório (Huldquist, 1991) para simular a presença ou não de um veículo. Para a geração, pode-se utilizar de distribuições de probabilidade, ou montar um perfil de tráfego manualmente, de efeitos tais como o "efeito pelotão", que acontece quando um sinal se abre para uma determinada via.

Os fluxos podem ser independentes para cada uma das faixas de cada via, uma vez que o simulador permite cruzamentos mais complexo, como será visto mais adiante. Ao assumir taxas de chegadas aleatórias tem-se uma maior confiabilidade no simulador e na validação do modelo.

O simulador também permite vários tipos de controle para o semáforo, que variam desde os controladores de tempo fixo até aqueles que permitem adaptações *on-line*. Além disso, uma vez que a simulação deve ser o mais próximo do real possível, o simulador considera o atraso do motorista, quando a fila entra em movimento. Este atraso para o simulador é de 3 segundos por fase, isto é, quando um determinado conjunto de vias recebe o verde, são necessários 3 segundos para o primeiro passar. Isto significa que para cada 10 segundos de verde o máximo de veículos que pode atravessar o cruzamento é 7 por faixa.

Para medir o efeito de cada controlador, o simulador também possui um módulo que calcula medidas de desempenho para cada tipo de controle, fornecendo, por exemplo, o atraso médio, as filas média e máxima e as fases médias e máxima.

Após muitas simulações e comparação de resultados, chegou-se a um total de onze regras que são disparadas todas as vezes que o controlador nebuloso verifica as condições de trânsito, para tomada de decisão.

Este novo conjunto de regras leva em consideração, somente as filas e as taxas de chegada no instante que o tráfego está sendo avaliado.

Sendo assim, as entradas para o controlador proposto são:

- **Chegadas** dos veículos para a via que tem fase verde, e
- **Fila** de veículos para via que possui fase vermelha.

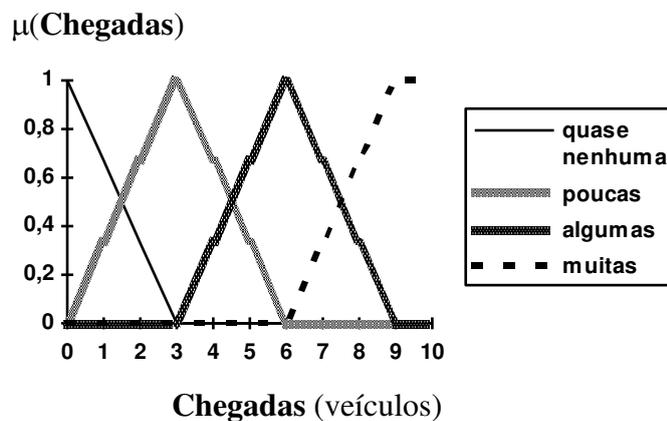
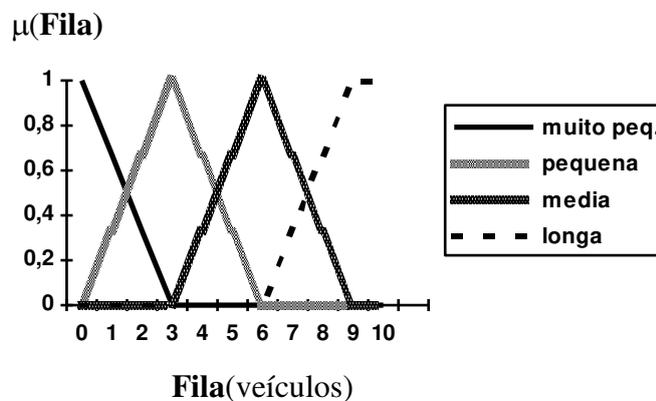
A saída é única e é dada por:

- **Extensão** da fase verde corrente, onde cada extensão é de no máximo 10 segundos, e o número de extensões podem ocorrer até um máximo pré-estabelecido de tempo de verde, o que é verificado por uma máquina de estado, antes de cada disparo do conjunto de regras.

A partir daí, pode-se estabelecer as variáveis lingüísticas e os valores lingüísticos associados:

- **Chegadas:** quase nenhuma, poucas, algumas, muitas.
- **Fila:** muito pequena, pequena, média, longa.
- **Extensão:** muito curta, curta, média, longa.

Os valores das funções de pertinência para cada conjunto nebuloso pode ser visto na figura 3.3, porém antes é preciso ressaltar que as partições para cada conjunto e os valores finais destas funções também foram obtidos experimentalmente, através do simulador.



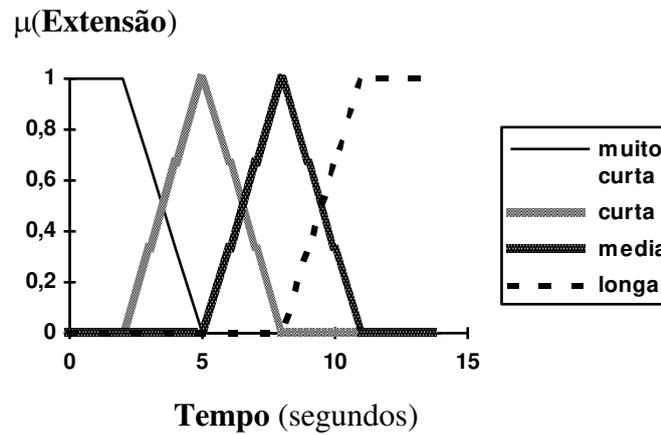


Figura 3.3: Representação Gráfica das Funções de Pertinência

O conjunto de regras que determinam a tomada de decisão do controlador é dado a seguir. Para facilitar a visualização do conjunto, utilizou-se da forma tabular, como pode ser observado na Tabela 3.1 abaixo.

----- Chegadas ----- Filas -----	quase nenhuma	poucas	algumas	muitas
<b>muito pequena</b>	muito curta	curta	média	longa
<b>pequena</b>	muito curta	muito curta	curta	média
<b>média</b>	muito curta	muito curta	muito curta	curta
<b>longa</b>	muito curta	muito curta	muito curta	muito curta

Tabela 3.1: Regras do Controle Nebuloso

Dessa tabela é possível formular as seguintes regras:

Se **chegadas** são *quase nenhuma*  
 e **fila** é *qualquer*  
 então **extensão** é *muito curta*

ou

Se **chegadas** são *poucas*  
 e **fila** é *muito pequena*  
 então **extensão** é *curta*

ou

Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>poucas</i> <i>pequena</i> <i>muito curta</i>
ou			
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>poucas</i> <i>média</i> <i>muito curta</i>
ou			
Se e então ou	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>algumas</i> <i>muito pequena</i> <i>média</i>
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>algumas</i> <i>pequena</i> <i>curta</i>
ou			
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>algumas</i> <i>média</i> <i>muito curta</i>
ou			
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>muitas</i> <i>muito pequena</i> <i>longa</i>
ou			
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>muitas</i> <i>pequena</i> <i>média</i>
ou			
Se e então	<b>chegadas</b> <b>fila</b> <b>extensão</b>	são é é	<i>muitas</i> <i>média</i> <i>curta</i>
ou			

Se	<b>chegadas</b>	são	<i>qualquer</i>
e	<b>fila</b>	é	<i>longa</i>
então	<b>extensão</b>	é	<i>muito curta</i>

Os conectivos *e* e *ou* são interpretados como os operadores *min* e *max* respectivamente. Dois métodos de defuzzificação foram testados, um que toma o máximo da função de pertinência e fornece como saída o valor do conjunto nebuloso correspondente a ele e o outro que calcula o centro de área, sendo que este último se mostrou mais eficiente nos resultados.

Além disso, três lógicas de tomada de decisão foram consideradas. A primeira, utilizada por Mamdani (1977), que aciona as regras de controle a cada segundo e toma o máximo das decisões como decisão final; a segunda também aciona as regras a cada segundo, mas tem como decisão final a média ponderada de cada uma das decisões intermediárias e finalmente a última que aciona as regras somente ao final do intervalo de 10 segundos, levando em conta somente o que acontece ao final do período de verificação.

Também nos estudos realizados por Mamdani (1977), a verificação das condições de tráfego é feita a cada 10 segundos, exceto a primeira de cada fase, que é feita aos 7 segundos. Isto significa que se a extensão do tempo de verde da fase corrente é menor do que 10 segundos a troca é automática para a fase seguinte, o que dá uma tendência ao controlador para manter fases curtas, o que nem sempre é bom, segundo resultados obtidos simulando-se o referido controlador. Além disso, se a defuzzificação determinar como valor de função de pertinência para a extensão calculada, um valor menor ou igual a 0.5, então a extensão é automaticamente zerada e a troca de fases é imediata.

O controlador proposto possui um limite menor de extensão mínima para a troca automática e também um limite menor para o valor da função de pertinência da extensão calculada. Os valores iniciais para estes limites são 3 e 0.2 respectivamente. No próximo capítulo veremos que estes valores podem sofrer adaptações.

Estes limites foram calculados através de simulações intensivas, para os quais obteve-se o melhor resultado. Também chegou-se à conclusão que estes valores não devem ser zero pois possuem a função de verificar se a extensão foi muito pequena, o que significa que a troca de fases pode acontecer.

Os resultados obtidos por este novo conjunto de regras podem ser observados e comparados na Tabela 3.2.

veículos/ hora via N - S	veículos/hora via L- O	atraso méd. (s) Ciclo Fixo	atraso méd. (s) - Mamdani -	atraso méd. (s) - Proposto -
360	1080	7.9	6.6	5.42
720	720	9.7	7.4	4.84
720	1080	10.8	8.8	5.77
720	1440	12.7	10.9	7.99
1080	1080	13.6	12.0	6.91
1080	1440	17.9	15.4	7.74
1440	1440	27.3	22.9	7.81

**Tabela 3.2: Resultados obtidos para um cruzamento simples**

Uma vez pronta esta etapa de desenvolvimento das regras e conjuntos nebulosos, o controlador foi estendido para um cruzamento multi-fases.

### 3.3. Cruzamento Multi-Fases

Quando se tem um cruzamento do tipo utilizado anteriormente, o ciclo é composto de duas fases e a troca de uma para outra se dá de maneira consecutiva.

Ao fazer a evolução para um cruzamento multi-fases, deve-se ter em mente que haverá vários conjuntos de vias esperando, enquanto um conjunto está em verde. Como consequência, o tempo de ciclo e o tempo de espera serão maiores. Para otimizar este esquema, implementou-se uma máquina de estado, que executa o seguinte algoritmo:

Procedimento Controla-Estados

conjunto **i** de vias ← fase verde

decisão = não trocar

$T \leftarrow$  tempo máximo admissível (Webster, 1966; Robertson, 1979)

Enquanto [(tempo de fase (conjunto **i**) <  $T$ ) ou (decisão = não trocar)]

    incrementa tempo de fase (conjunto **i**)

    aciona controle nebuloso

    determina decisão

conjunto inicial ← conjunto **i**

próximo conjunto ← conjunto **i+1**

Enquanto [(fila **i + 1** = 0) e (próximo conjunto ≠ conjunto inicial)]

    próximo conjunto ← próximo conjunto + **1**

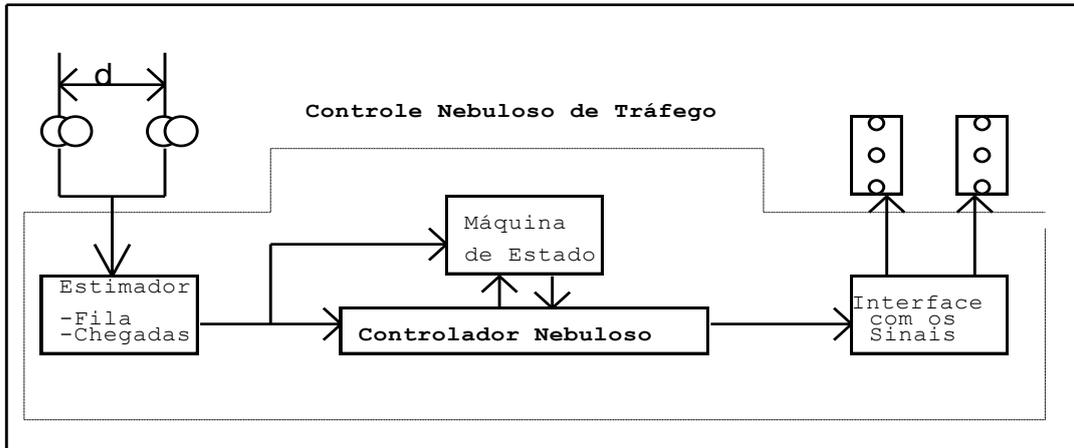
Se todas as filas = 0

    Então via principal ← fase verde

    Senão próximo conjunto ← fase verde.

Fim Controla-Estados

O cruzamento modelo para o estudo de multi-fases pode ser observado na figura 2.5c, o qual possui 4 fases. O controlador possui agora, a seguinte forma (figura 3.4):



**Figura 3.4: Diagrama de Blocos para o controlador com a Máquina de Estado**

As entradas para este cruzamento continuam sendo as mesmas, e sendo assim, algumas mudanças foram feitas, a fim de transformá-las convenientemente para o controle nebuloso.

Além disso, neste tipo de cruzamento são considerados fluxos de conversão, que dependem do ângulo da curva. Assim, estes fluxos são normalizados, ou seja, convertidos em fluxo padrão, onde o número de carros que vai converter à direita é multiplicado por 1.6 e o número de carros que vai converter à esquerda, por 1.4 (Robertson, 1979).

Como são atendidas várias faixas em uma mesma fase de verde, e várias outras esperam pelo seu tempo durante o vermelho, o procedimento adotado foi tomar a fila máxima entre as filas em vermelho e o máximo do número de chegadas para as faixas em verde como entradas do controlador, sendo estas já normalizadas.

Os resultados obtidos com o novo controlador supera a estratégia proposta por Mamdani (1977) também neste tipo de cruzamento, conforme ilustra a Tabela 3.3:

Total de Veículos no Cruzamento/hora	Atraso Médio (s) - Ciclo Fixo -	Atraso Médio (s) - Mamdani -	Atraso Médio (s) - Nova Proposta -
11400	11.48	11.45	7.565
11900	13.17	11.40	10.35
15800	16.52	16.37	14.76
18000	16.91	22.32	15.62
18800	16.44	14.98	13.90
20600	13.33	11.30	8.00
21000	15.70	8.62	6.13
21200	15.48	8.53	5.83

**Tabela 3.3: Resultados obtidos a partir de um cruzamento multi-fases**

É importante observar que todas as medidas de desempenho obtidas para o controle com estratégia de Ciclo Fixo são feitas com o ótimo para cada situação, o que pode explicar o fato de que em alguns casos, ele se comporta melhor do que o controle nebuloso proposto por Mamdani (1977).

Deve-se notar que não só a quantidade de veículos pode se alterar mas também como estes veículos se distribuem pelas vias do cruzamento, o que esclarece o atraso menor com densidades maiores de fluxos. Porém as condições de testes são idênticas para todas as estratégias.

No capítulo 5 serão analisadas outras situações.

### 3.4. Resumo

Neste capítulo, apresentou-se o desenvolvimento de um controlador nebuloso, explicando-se a sua estrutura, isto é, os conjuntos nebulosos associados às variáveis lingüísticas, as regras e cada um dos índices utilizados. Foi também feita uma extensão do sistema de controle para o caso de um cruzamento multi-fases.

O próximo capítulo apresenta métodos de controle adaptativo, bem como suas implicações em controle de tráfego urbano.

# 4. ESTRATÉGIAS DE ADAPTAÇÃO

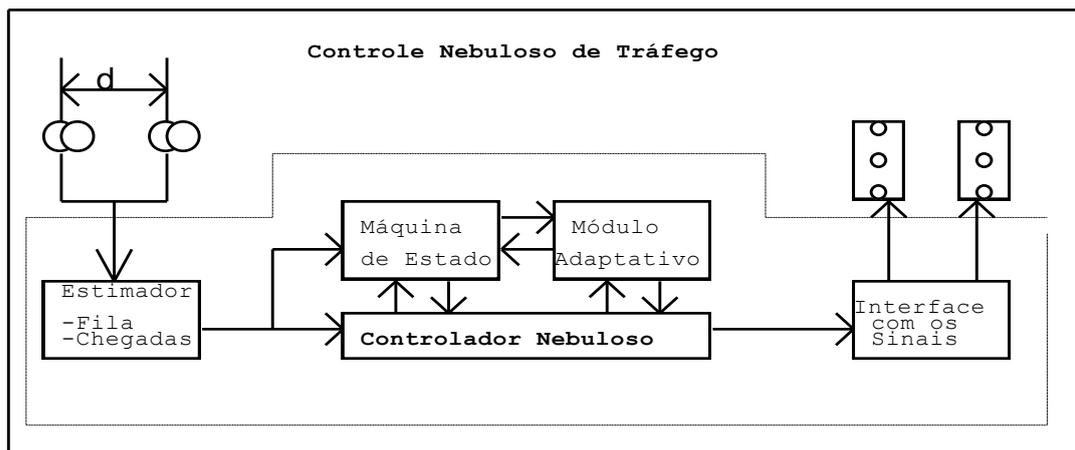
## 4.1. Introdução

A densidade do fluxo de veículos depende da hora do dia. Durante as horas de pico, podem ocorrer grandes concentrações de fluxos e fora deles pode ocorrer fluxo quase zero. Estas variações de fluxo podem também ocorrer momentaneamente. Sendo assim, o controlador de tráfego é tanto melhor quanto mais rápido e eficientemente responder a estas variações.

Quando uma dessas situações ocorrer, é necessário que o próprio controlador adote uma estratégia apropriada de maneira rápida, e assim que o sistema voltar ao estado normal, ele deve fazer uma adaptação.

Existem várias estratégias de adaptação, que podem utilizar ferramentas das mais simples às mais sofisticadas. Neste trabalho, duas delas foram estudadas e implementadas (Favilla *et al*, 1993). A primeira utiliza estatísticas sobre a densidade de fluxo. A segunda, um supervisor baseado em lógica nebulosa.

Ao implementar o módulo adaptativo tem-se um novo diagrama, agora completo, para o controlador desenvolvido, conforme mostra a figura 4.1.



**Figura 4.1: Diagrama de Blocos do Controlador**

## 4.2. Adaptação Estatística

A estratégia adotada para este tipo de adaptação foi a seguinte: a cada segundo, toma-se o número de chegadas de veículos. Esta medida é feita para cada faixa de cada via de aproximação do cruzamento. Toma-se o máximo destas medidas e faz-se o seu armazenamento. Este procedimento é repetido até que se totalize 180 segundos de verificação. Em seguida, calcula-se a média  $M$  e o desvio padrão  $\sigma$  para este conjunto de dados.

Com essas informações, calcula-se o novo limite superior dos intervalos de domínio (universo) das funções de pertinência para **Chegadas** e **Filas** que são ajustados da seguinte maneira:

Procedimento Adapta

$$\begin{aligned} l_{s_{adapt}} &= (M + 3 \cdot \sigma) \\ \text{se } l_{s_{adapt}} &\leq 10 \\ \text{então } l_{s_{novo}} &= l_{s_{adapt}} \\ \text{senão } l_{s_{novo}} &= l_{s_{anterio}} \end{aligned} \tag{3.01}$$

Fim Adapta

onde:

$l_s$  = limite superior do universo de *extensões*.

Esta estratégia de adaptação se refere aos antecedentes das regras de inferência do controlador. Além disso, da maneira como foi proposta, permite ao controlador se adaptar a situações de tráfego pouco intenso, uma vez que o limite novo a ser encontrado é sempre menor ou igual a dez. Limites maiores não foram tratados pois tem-se como máximo das entradas exatamente 10 segundos, que, devido ao posicionamento dos sensores é possível identificar no máximo 10 veículos. Sendo assim, não haveria sentido físico para uma entrada maior que 10, tanto para chegadas quanto para filas. O limite superior mínimo para o intervalo de domínio foi obtido experimentalmente e vale 4.

O resultado que determina que o limite adaptado deve ser a média calculada mais três vezes o desvio padrão é devido ao fato de que dentro de uma distribuição normal, o número de casos previstos pelo intervalo

$$[M - 3\sigma, M + 3\sigma]$$

abrange 97% das ocorrências (Hoel, 1971). Além disso, quando soma-se à média o desvio padrão, novamente está se prevendo o pior caso.

Os resultados obtidos com essa estratégia de adaptação mostram que o controlador se torna mais sensível e portanto mais eficiente quando as variações no tráfego ocorrem. Porém, esta é uma estratégia que não responde de imediato a estas mesmas variações, pois as verificações são feitas a cada 3 minutos e os resultados são aplicados no próximo intervalo. Em termos de trânsito isto pode significar um tempo muito grande. O que às vezes chega a ocorrer é uma adaptação defasada, isto é, quando o controlador começa a aplicar a nova estratégia de controle, pode ser que a situação já tenha se modificado novamente, ocasionando assim, uma queda no desempenho do sistema.

Além disso, os cálculos realizados e a quantidade de dados armazenados necessitam de um tempo computacional maior para determinar a ação de controle, o que pode ser comprovado através das simulações realizadas.

A Tabela 4.1, a seguir, mostra alguns resultados para algumas situações de tráfego, utilizando o controlador proposto sem adaptação, e com adaptação estatística. Deve-se observar que as densidades utilizadas nas simulações são densidades médias, sendo que ocorrem pequenas variações de fluxos ao longo do tempo de simulação, a fim de se verificar o comportamento do módulo adaptativo.

Total de veículos por hora no cruzamento	Atraso Médio (s) sem adaptação	Atraso Médio (s) com adaptação estatística	Melhora %
11400	7.56	6.74	10.85
4800	4.15	4.04	2.65
3350	3.68	3.67	0.27
1650	3.30	3.30	0.00

**Tabela 4.1: Comparação controlador sem adaptação e com adaptação estatística**

Pela tabela acima é possível observar que quando a densidade de tráfego é muito baixa, a adaptação não é muito efetiva, pois estando o controlador bem sintonizado, o seu desempenho é satisfatório. A média de 11400 veículos por hora no cruzamento, embora pareça um número grande, esta não se aproxima do fluxo de saturação, consistindo, portanto uma média de tráfego pouco intenso conforme dito anteriormente, onde o adaptador estatístico funciona bem.

### 4.3. Adaptação via Lógica Nebulosa

A estratégia de adaptação via lógica nebulosa tem como objetivo principal otimizar o funcionamento do controlador nebuloso, sob qualquer condição de tráfego, isto é, deseja-se fazer uma adaptação de contexto das situações, independente do tipo de variação que elas apresentarem.

Seguindo essa linha, o controlador nebuloso deve agir como um ajuste fino enquanto que o módulo adaptativo como um macro controlador, verificando as condições do cruzamento como um todo.

Ao contrário da adaptação estatística, a adaptação via lógica nebulosa faz variar o universo associado ao conseqüente das regras do controlador, ou seja, calcula-se o novo limite superior do intervalo de domínio da função de pertinência para a variável **Extensão (LSE)**. Uma das vantagens é a liberdade de variação, que pode ser tanto positiva quanto negativa, pois este não depende de sensores, ou qualquer outro tipo de medida. Para esta tarefa, tem-se o módulo adaptativo estruturado da seguinte maneira:

As variáveis de entrada são:

- **Fila Residual** ao final da fase de verde, definida no universo de discurso D.
- **Variação da Fila** durante a fase verde, definida no universo de discurso V.

A variável de decisão é:

- **Variação do limite superior** do intervalo, definida no universo de discurso U.

Esta variável de decisão determina o quanto comprimir ou quanto expandir o domínio da função de pertinência para **Extensão**. A versatilidade desta estratégia também se mostra no fato de que esta variação pode ser diferente para cada fase do controlador, isto é, as entradas são feitas considerando-se cada via de aproximação independentemente. Portanto a variável de controle pode ser uma para cada fase, dependendo somente da densidade de fluxo que acontece em cada via. Ou seja, cada via de aproximação pode ter o seu próprio universo. O algoritmo para esta estratégia é dado por:

#### **Procedimento Calcula Variação**

conjunto **i** de vias ← fase verde

Se início de fase

FILA MAIOR ← maior fila **j** (conjunto **i**)

Se final de fase

calcula variação (FILA MAIOR)

calcula fila residual (FILA MAIOR)

Chama **Procedimento Adaptativo Nebuloso**

$LSE_{NOVO}$  (conjunto **i**) =  $LSE_{CALCULADO}$  (conjunto **i**)

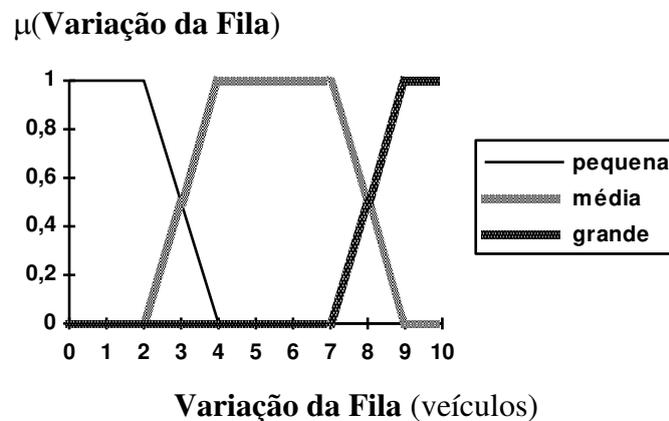
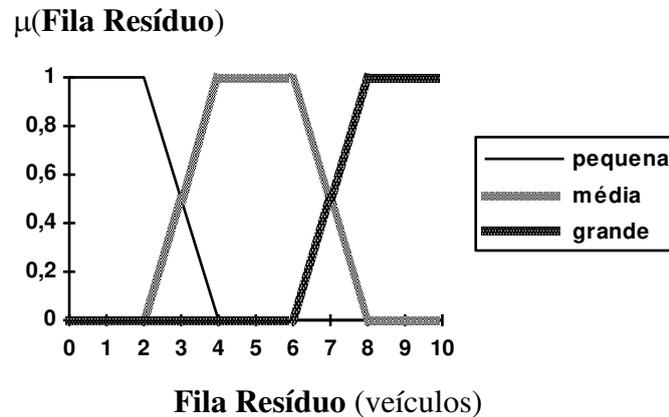
**Fim Calcula Variação**

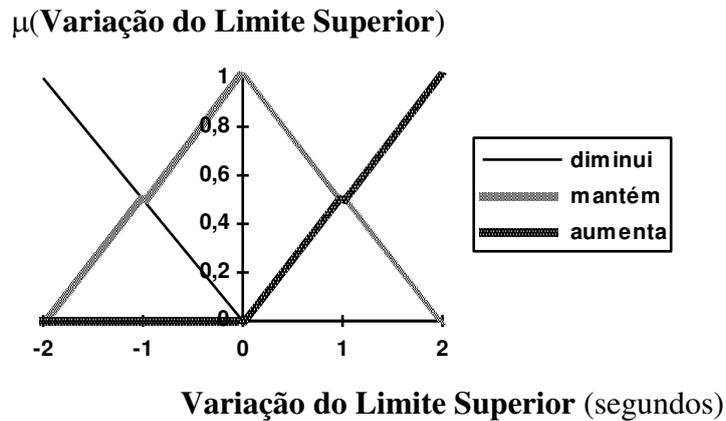
Dado este algoritmo é possível notar que o tempo de resposta da adaptação é bem mais rápido que o anterior, uma vez que já na próxima fase verde do conjunto de vias em questão, este estará trabalhando dentro do novo universo, lembrando que cada conjunto tem o seu próprio universo particular.

Agora já é possível descrever detalhadamente o módulo adaptativo. Assim como no controlador nebuloso, cada conjunto e cada regra de adaptação foram obtidos experimentalmente, através de simulações. As variáveis lingüísticas e os valores lingüísticos associados são:

- **Fila Residual:** pequena, média, grande.
- **Varição da Fila:** pequena, média, grande.
- **Varição do limite superior:** diminui, mantém, aumenta.

Os valores das funções de pertinência para cada conjunto nebuloso pode ser visto na figura 4.2 abaixo.





**Figura 4.2: Funções de Pertinência para o Módulo Adaptativo**

O conjunto de regras que determinam a tomada de decisão do módulo adaptativo é dado a seguir, conforme Tabela 4.2.

----- Fila Resíduo ----- Variação da Fila --	Pequena	Média	Grande
Pequena	diminui	aumenta	aumenta
Média	diminui	mantém	aumenta
Grande	diminui	diminui	mantém

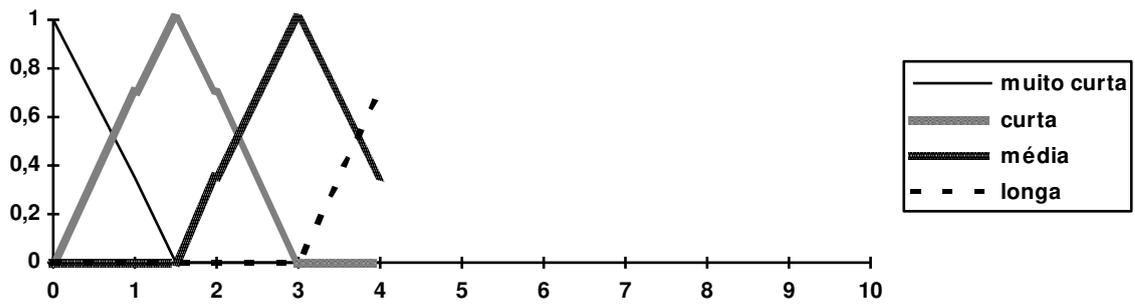
**Tabela 4.2: Regras do Módulo Adaptativo Nebuloso**

As regras obtidas a partir desta tabela também são do tipo Se...então...ou, como descritas no capítulo 3. Manteremos aqui somente o formato de tabela, pois é de fácil compreensão, e assim pode-se evitar repetições.

A variação para o limite superior do conjunto de extensões é de 4 a 20 segundos, os quais também foram obtidos experimentalmente.

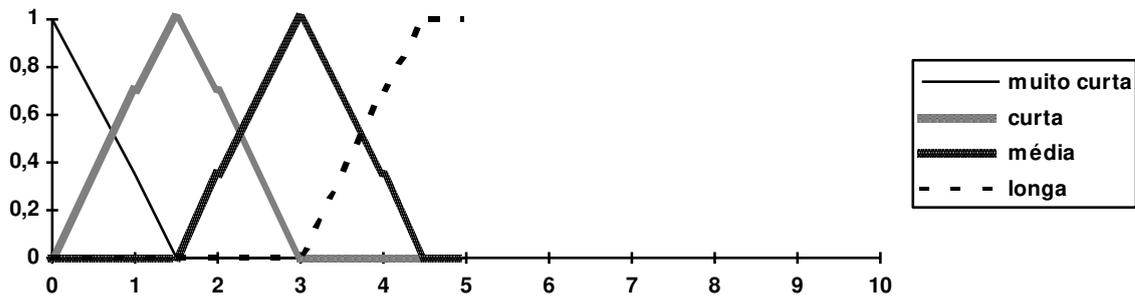
A figura 4.3 ilustra como o domínio da função de pertinência da variável de controle varia, bem como as suas partições que estão descritas no capítulo 3, de acordo com o módulo adaptativo.

$\mu$  (Extensão)



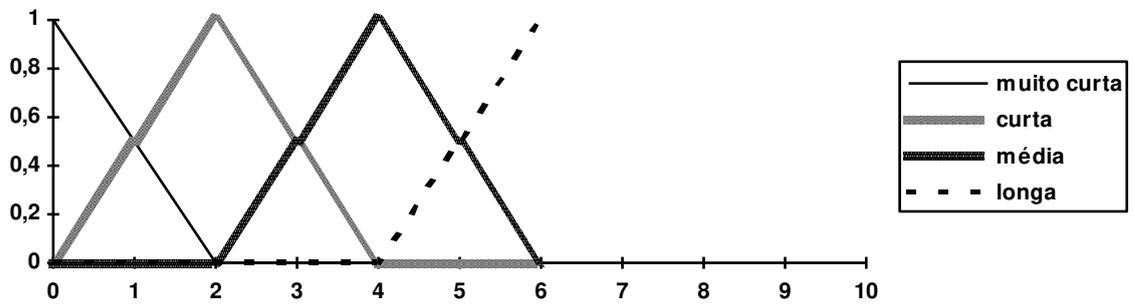
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



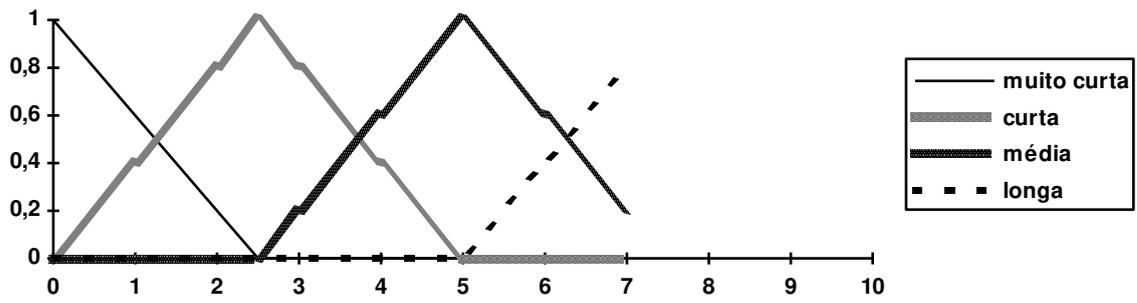
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



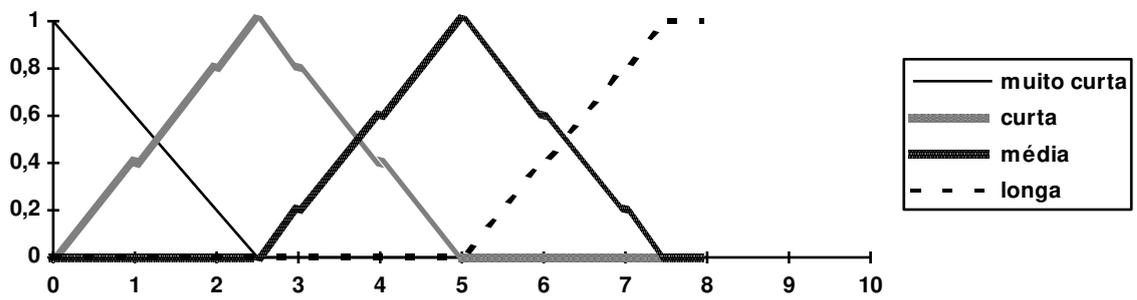
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



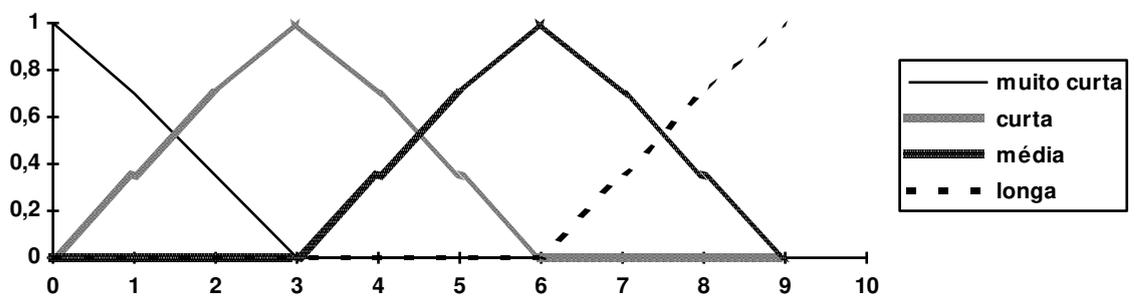
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



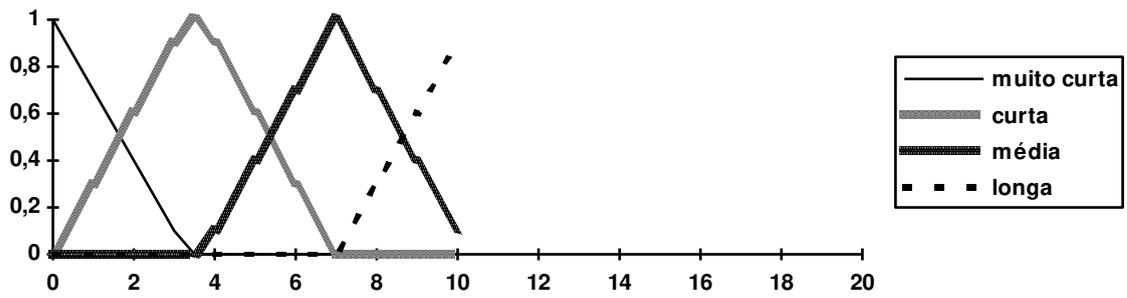
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



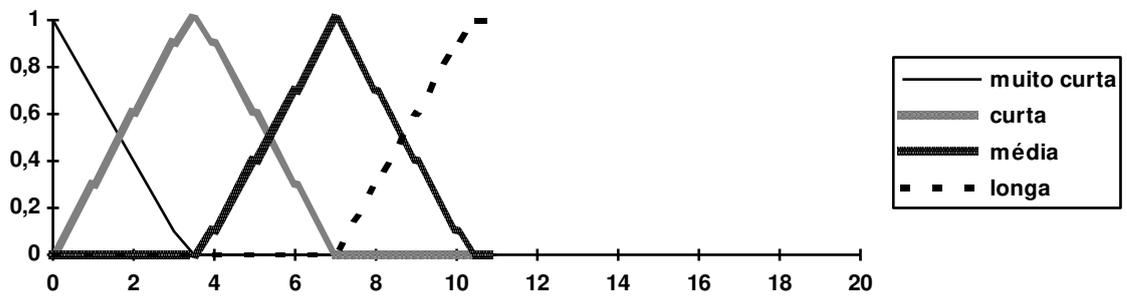
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



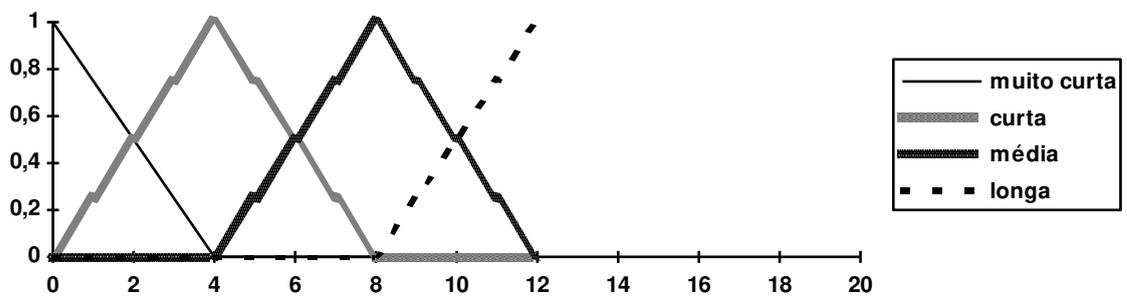
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



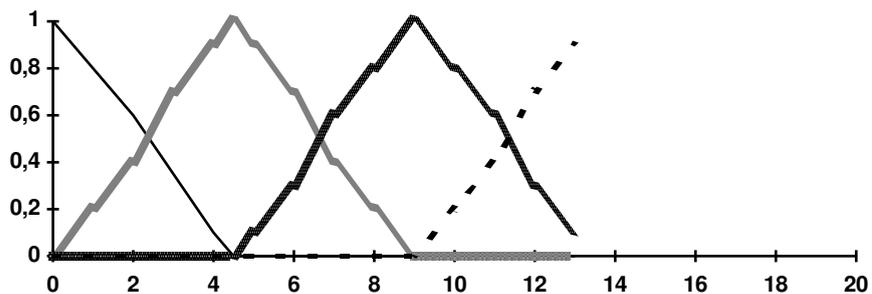
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



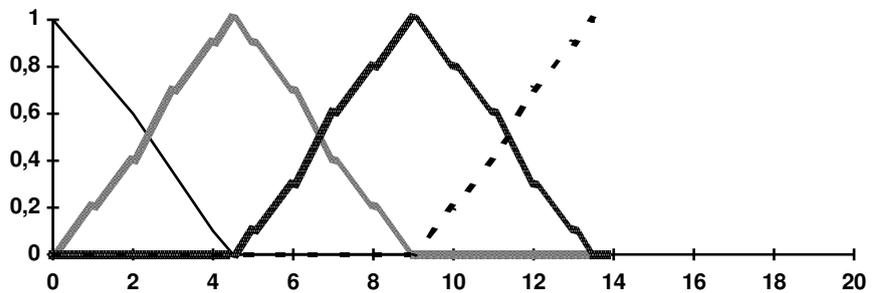
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



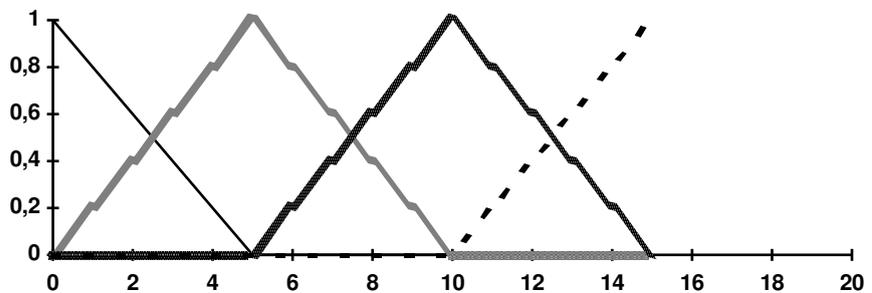
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



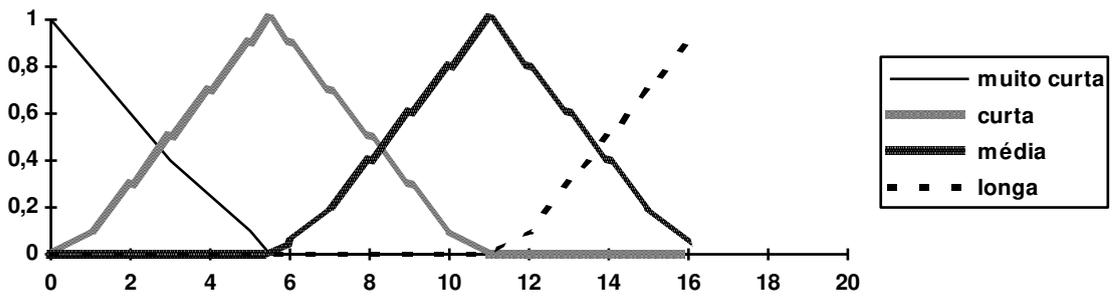
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



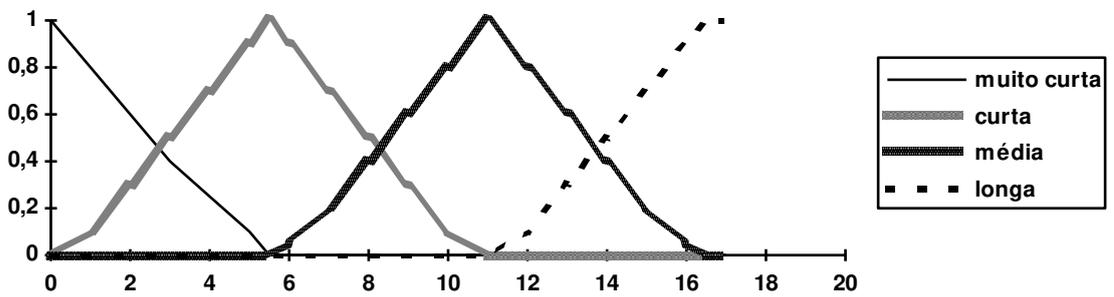
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



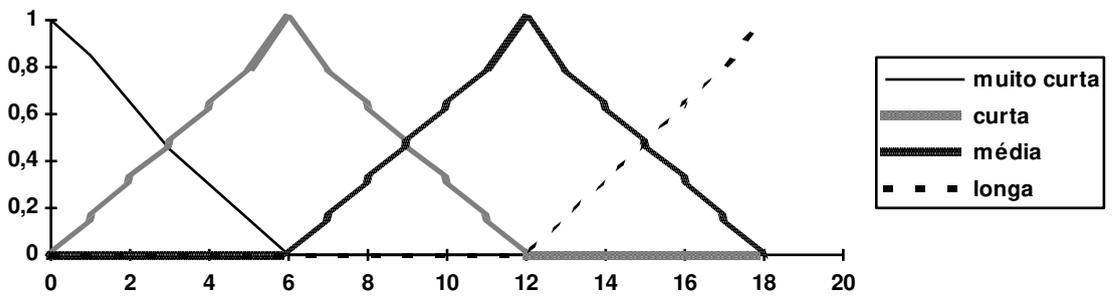
Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)

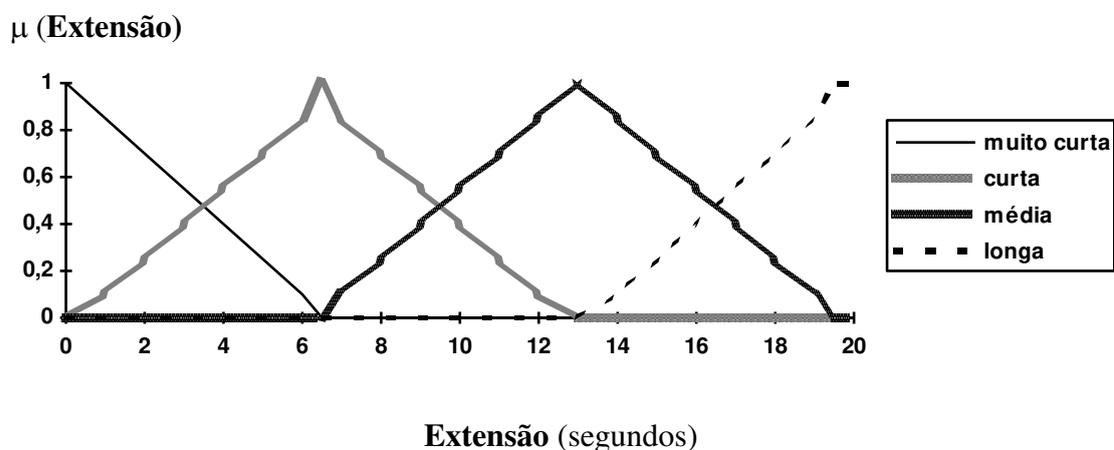
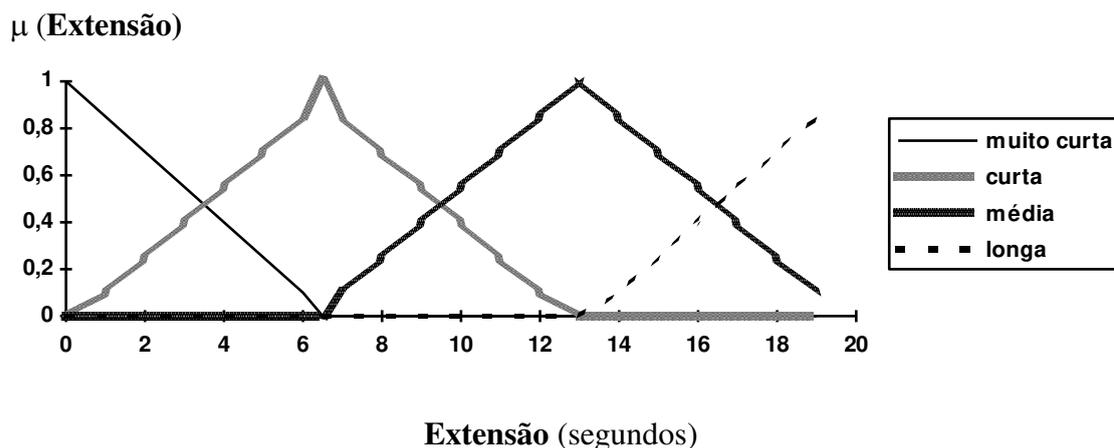


Extensão (segundos)

$\mu$  (Extensão)



Extensão (segundos)



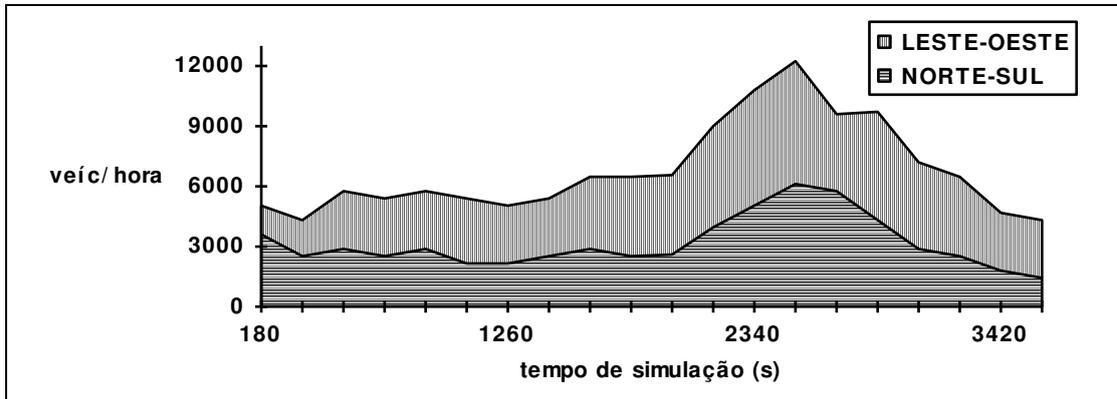
**Figura 4.3: Variação do limite superior para o domínio de Extensões**

O desempenho do controlador é melhor quando o módulo adaptativo é acionado, o que pode ser comprovado com o exemplo a seguir que é feito utilizando-se uma alta densidade de fluxo.

Como foi visto no capítulo anterior, o número máximo de veículos que atravessa o cruzamento é 7 a cada 10 segundos, por faixa. Como se trata de um cruzamento multi-fases, o número de faixas atendidas por fase também varia.

Para este teste do módulo adaptativo, as densidades de fluxo não são mais constantes ao longo da simulação. Estas agora devem variar, sendo que algumas mudanças ocorrem abruptamente. O período de simulação é de 3600 segundos, limite este estabelecido pela capacidade do ambiente de computação utilizado. Mas é suficiente para mostrar o comportamento do controlador adaptativo.

O gráfico a seguir mostra as densidades de veículos dos conjuntos de vias concorrentes ao longo do tempo de simulação. Para não dificultar o entendimento do gráfico, tomou-se somente o conjunto com densidade máxima para cada fase, ou seja, o pior caso, pois os outros certamente serão atendidos.



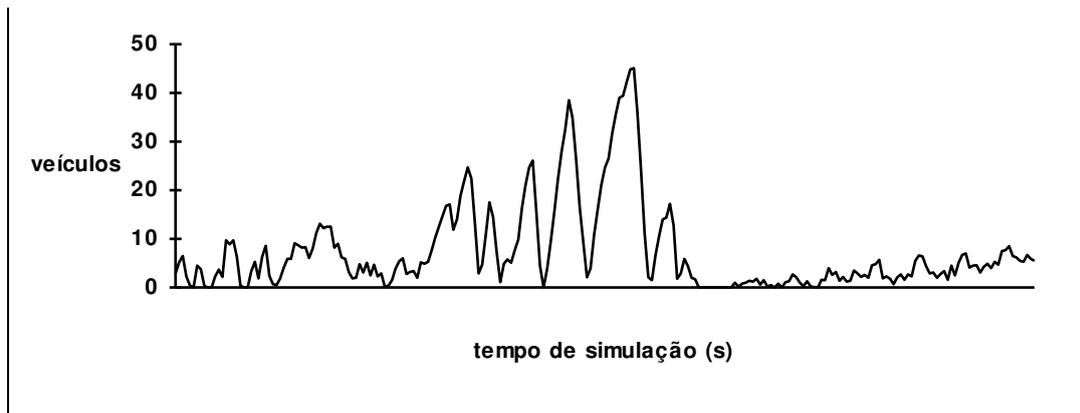
**Figura 4.4: Densidades de fluxo para o exemplo**

Os testes, agora, foram realizados apenas para o controlador nebuloso, a fim de verificar o papel do módulo adaptativo, através das medidas de desempenho para o controlador sem e com o módulo acionado. O controlador com módulo adaptativo acionado obteve melhores resultados, o que pode ser verificado na Tabela 4.3 a seguir, que não só mostra medidas de desempenho, mas também as medidas que mostram o seu comportamento.

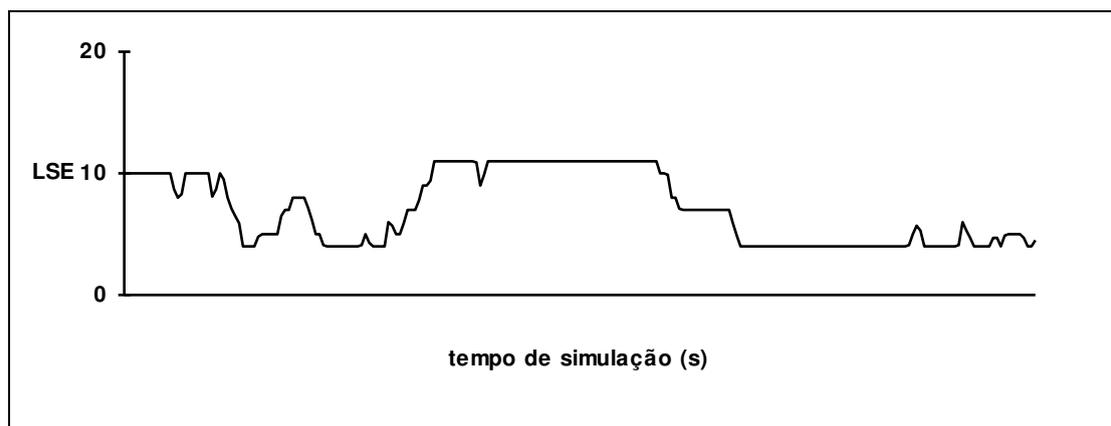
◆◆◆◆◆◆◆◆	Controle sem Adaptação	Controle com Adaptação
Atraso Médio (segundos)	111.43	40.32
Fila Média (veículos)	32.45	11.92
Fase Média (segundos)	11.46	23.31
Máxima Fila (veículos)	268.2	81
Máxima Fase (segundos)	15	132

**Tabela 4.3: Resultados obtidos para comparação do controle com e sem adaptação**

Um outro dado interessante para avaliação do módulo adaptativo é a variação do LSE em função do tamanho das filas. A figura a seguir mostra dois gráficos. O primeiro representa a variação da fila máxima de um conjunto de vias escolhido aleatoriamente. O segundo representa a variação do limite superior para este conjunto.



**Figura 4.5.a: Variação da fila**



**Figura 4.5.b: Variação do Limite Superior**

Uma questão que pode surgir é porque o LSE não aumenta mais. A resposta é simples: a densidade do fluxo concorrente é também uma densidade elevada, conforme ilustra a figura 4.4. Então o controlador, bem como o módulo adaptativo devem ponderar todos estes fatores a fim de não deixar que uma fila muito longa se forme no conjunto de vias em vermelho e assim criar um círculo vicioso.

## 4.4. Resumo

Neste capítulo foram apresentadas duas estratégias de adaptação desenvolvidas e implementadas bem como os resultados correspondentes. Nesta etapa do trabalho também foi concluído o controlador desenvolvido.

O próximo capítulo mostra um estudo de caso aplicando as estratégias de controle até aqui apresentadas.

## 5. UM ESTUDO DE CASO

### 5.1. Introdução

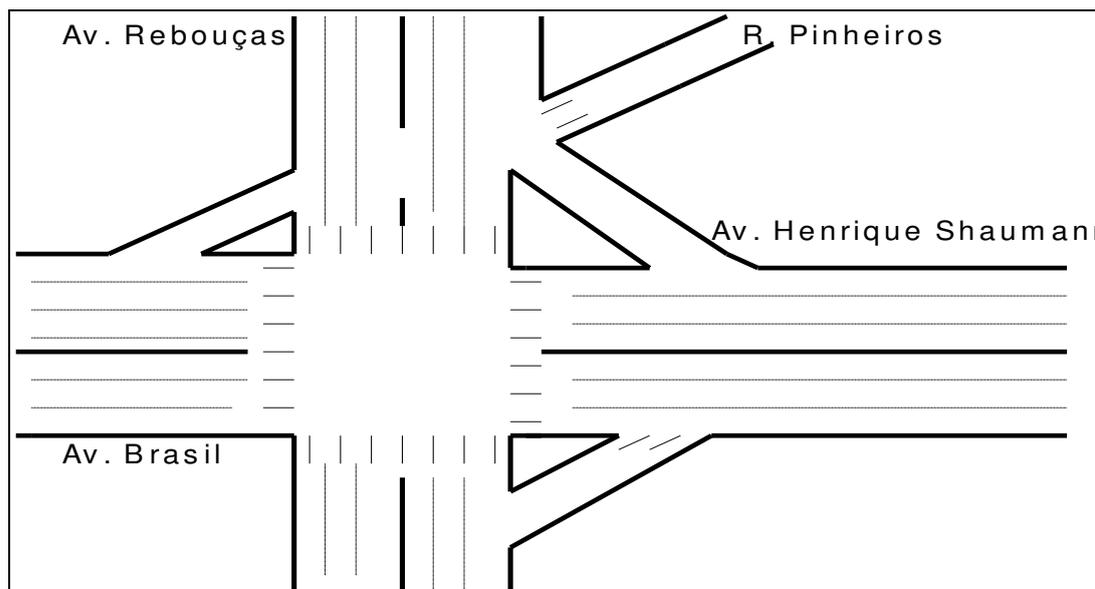
Até este ponto foram desenvolvidas uma estratégia de controle baseada em Lógica Nebulosa, e duas estratégias de adaptação, uma estatística e outra também baseada em Lógica Nebulosa.

A fim de analisar e validar estas estratégias, um estudo de caso foi realizado. Trata-se do cruzamento entre as Avenidas Rebouças e Brasil e mais a confluência da Rua Pinheiros, na cidade de São Paulo.

A seguir tem-se o desenvolvimento detalhado deste estudo.

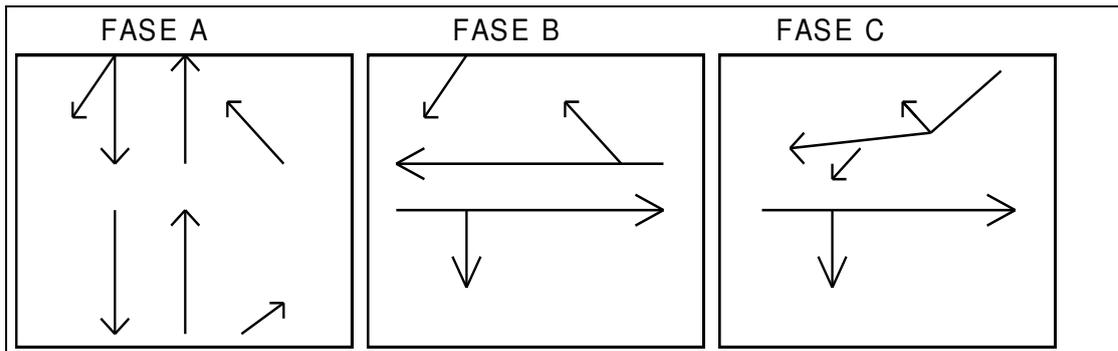
### 5.2. O Cruzamento

Este cruzamento foi escolhido por ser de grande importância à malha viária urbana da cidade de São Paulo e um ponto delicado, se considerarmos a densidade de tráfego que ocorre durante o dia. O *layout* da intersecção é mostrada na figura 5.1 abaixo.



**Figura 5.1: *Layout* do cruzamento**

Este cruzamento requer um semáforo tri-fásico, conforme ilustra a figura 5.2.



**Figura 5.2: Conjunto de Fases do Cruzamento**

Para uma comparação realista, dados reais foram gentilmente cedidos pela CET - Companhia de Engenharia de Tráfego da cidade de São Paulo. Estes dados constituem-se das médias diárias de fluxos tomados para cada 15 minutos ao longo do dia, durante uma semana, incluindo finais de semana e feriados. Também foram enviados os planos de controle baseados em ciclos fixos que se alternam ao longo do dia, ao longo da semana, que hoje controlam o local.

### 5.3. Simulações

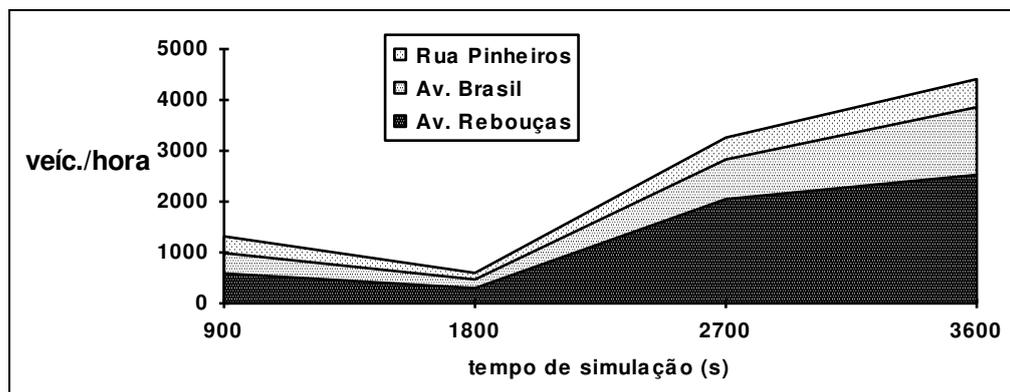
As simulações foram feitas para o controlador desenvolvido, sem e com adaptação e também para o controlador baseado nos planos enviados pela CET.

O conjunto de dados enviados foi dividido em 4 grupos para facilitar a visualização do desempenho e também pelo limite da capacidade de computação. Cada um desses grupos foi chamado de Período, e representam, juntos, um dia inteiro de tráfego. O agrupamento não se deu em função de tempo, mas sim em função da densidade de veículos e, como consequência, em função dos planos utilizados. Existem planos que permanecem em ação por mais de 2 horas enquanto que outros por apenas 15 minutos. Cada período de simulação é de 3600 segundos, com 15 minutos para cada plano.

Embora os detectores reais consigam identificar no máximo 10 veículos por faixa, o simulador é capaz de medir qualquer tamanho de fila, a fim de calcular os atrasos e filas para medir os desempenhos de cada uma das estratégias de controle.

Para cada período serão mostrados os gráficos que representam as médias das densidades de tráfego ao longo do período de simulação, um diagrama dos planos fixos correspondentes, uma tabela com resultados comparativos e um conjunto de gráficos que mostra o desempenho do módulo adaptativo.

- **Período 1**



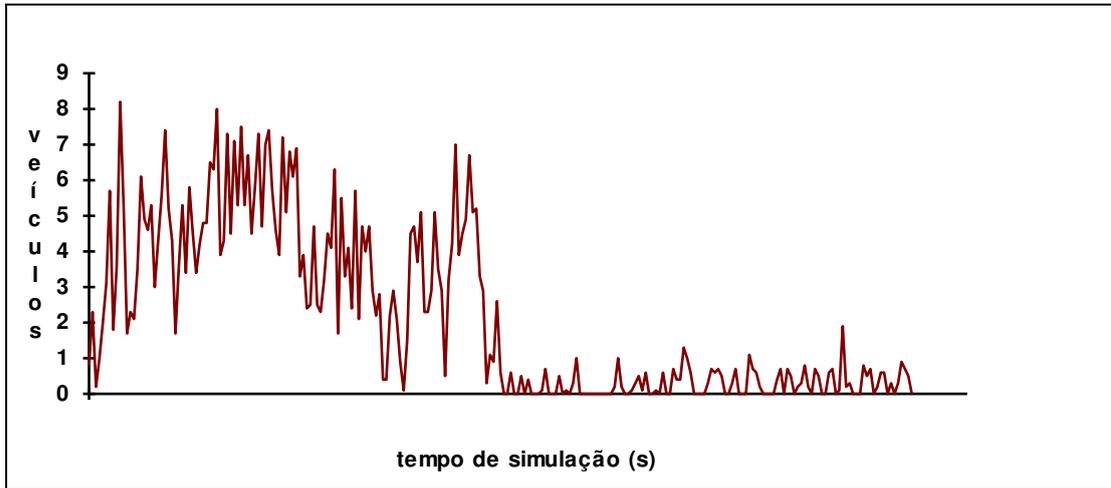
**Figura 5.3: Fluxo para Período 1**

	Fase A (s)	Fase B (s)	Fase C (s)
<b>Plano 1</b>	<b>52</b>	<b>7</b>	<b>21</b>
<b>Plano 2</b>	<b>52</b>	<b>7</b>	<b>21</b>
<b>Plano 3</b>	<b>97</b>	<b>7</b>	<b>16</b>
<b>Plano 4</b>	<b>132</b>	<b>7</b>	<b>21</b>

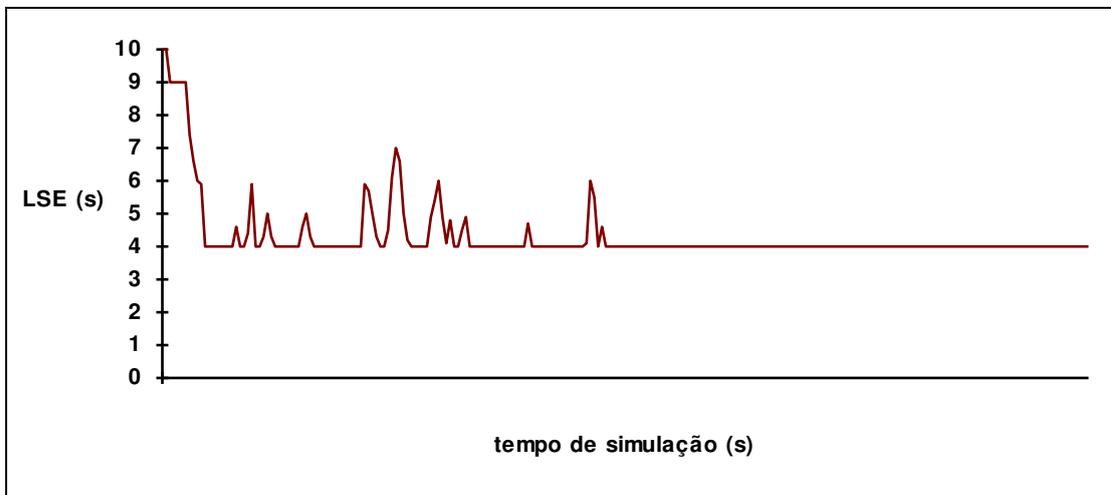
**Tabela 5.1: Planos de controle para Período 1**

----- Controle ----- Medida -----	Plano Fixo	Nebuloso sem Adaptação	Nebuloso com Adaptação Estatística	Nebuloso com Adaptação Nebulosa
<b>atraso médio (segundos)</b>	<b>16.02</b>	<b>8.94</b>	<b>8.33</b>	<b>9.75</b>
<b>fila média (veículos)</b>	<b>1.44</b>	<b>0.79</b>	<b>0.73</b>	<b>0.86</b>
<b>fila máxima (veículos)</b>	<b>15</b>	<b>14</b>	<b>14</b>	<b>10</b>

**Tabela 5.2: Comparação das Medidas de Desempenho**



**Figura 5.4.a: Variação da Fila durante o Período de Simulação**



**Figura 5.4.b: Variação do Limite Superior de Extensões em Função da Fila**

- Período 2

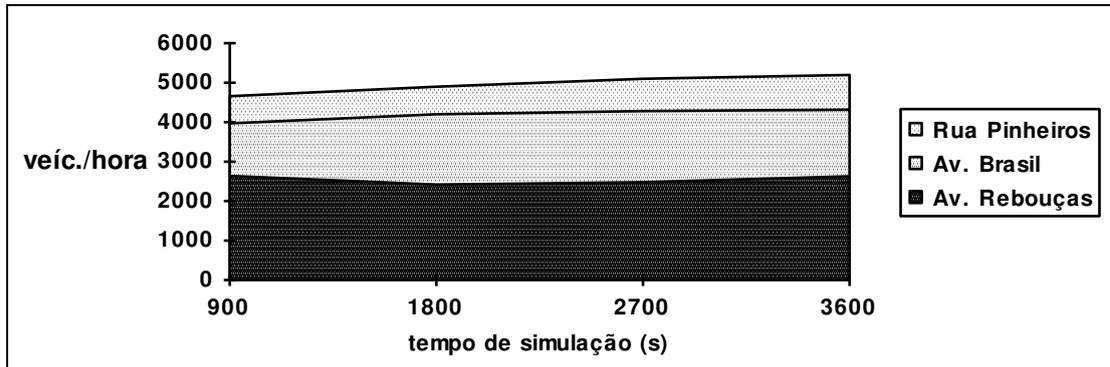


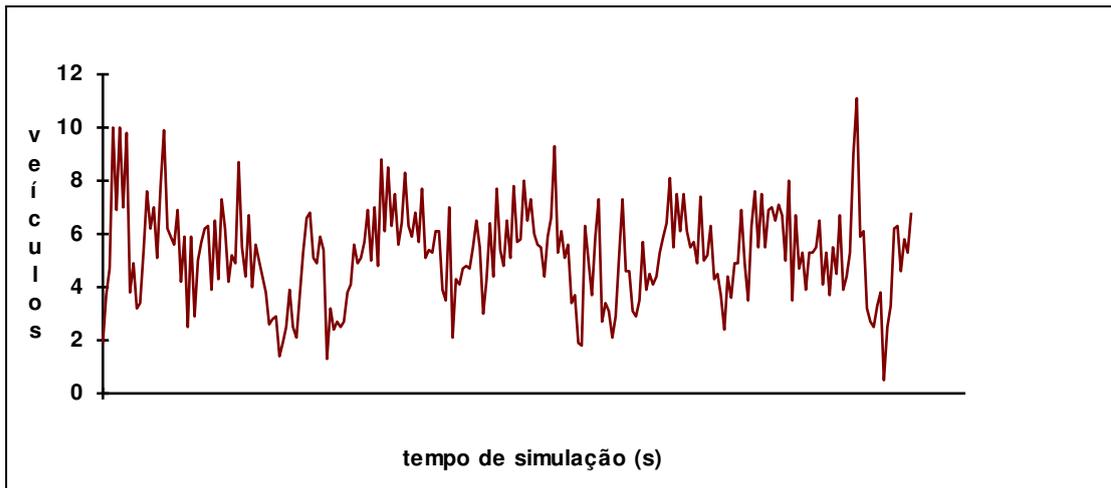
Figura 5.5: Fluxo para Período 2

	Fase A (s)	Fase B (s)	Fase C (s)
Plano 1	127	7	26
Plano 2	122	7	31
Plano 3	122	7	31
Plano 4	119	7	34

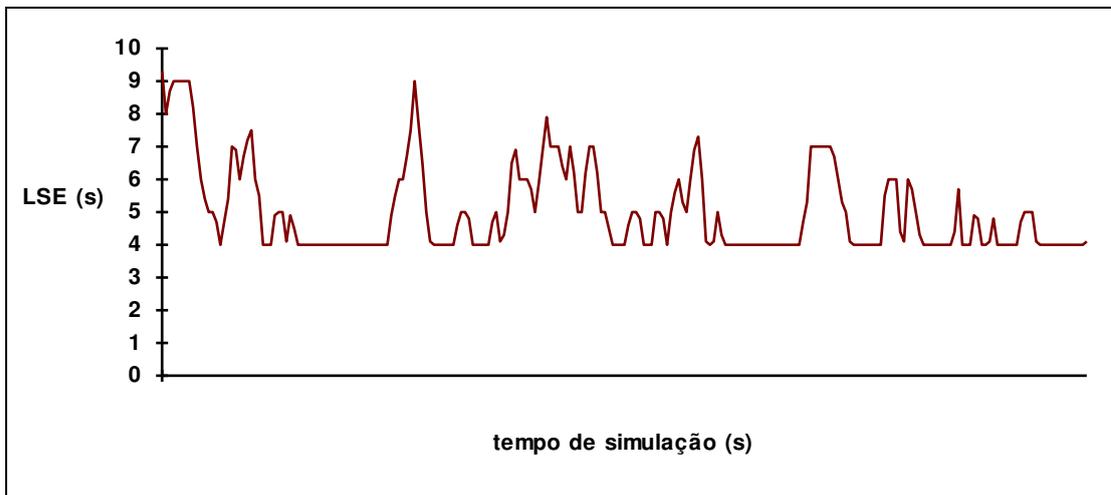
Tabela 5.3: Planos de controle para período 2

----- Controle ----- Medida -----	Plano Fixo	Nebuloso sem Adaptação	Nebuloso com Adaptação Estatística	Nebuloso com Adaptação Nebulosa
atraso médio (segundos)	55.99	11.28	12.38	11.94
fila média (veículos)	9.64	2.05	2.25	2.17
fila máxima (veículos)	51	16	23	17

Tabela 5.4: Comparação das Medidas de Desempenho

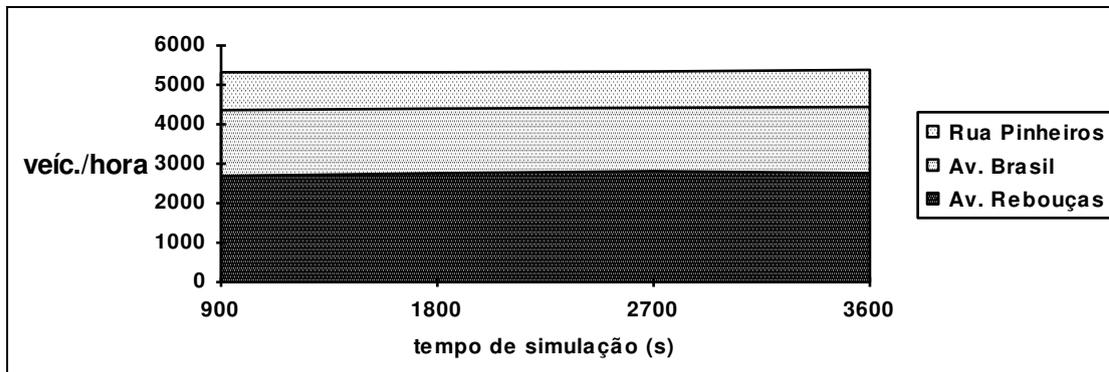


**Figura 5.6.a: Variação da Fila durante o Período de Simulação**



**Figura 5.6.b: Variação do Limite Superior de Extensões em Função da Fila**

- **Período 3**



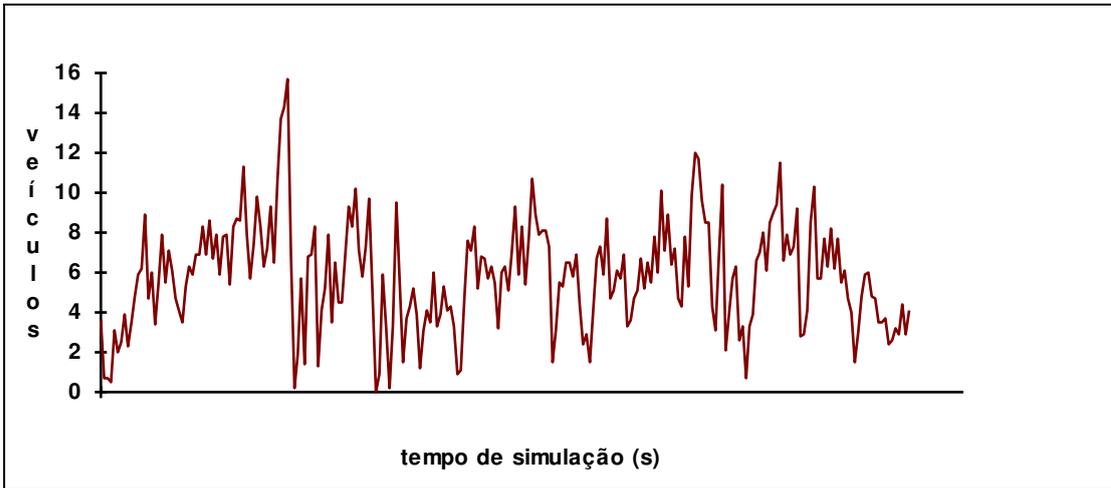
**Figura 5.7: Fluxo para Período 3**

	Fase A (s)	Fase B (s)	Fase C (s)
<b>Plano 1</b>	<b>113</b>	<b>7</b>	<b>30</b>
<b>Plano 2</b>	<b>119</b>	<b>7</b>	<b>34</b>
<b>Plano 3</b>	<b>115</b>	<b>7</b>	<b>28</b>
<b>Plano 4</b>	<b>123</b>	<b>7</b>	<b>30</b>

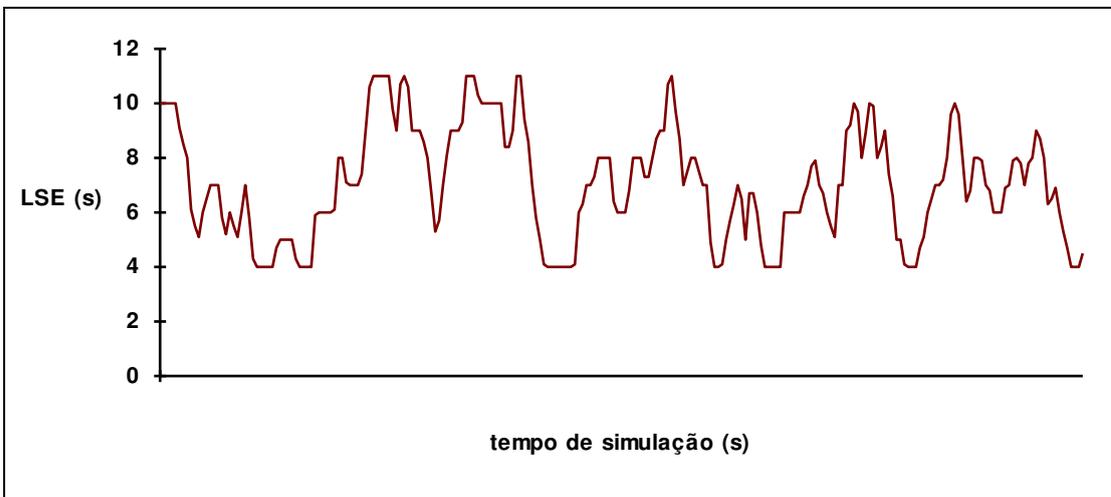
**Tabela 5.5: Planos de controle para período 3**

----- Controle ----- Medida -----	Plano Fixo	Nebuloso sem Adaptação	Nebuloso com Adaptação Estatística	Nebuloso com Adaptação Nebulosa
<b>atraso médio (segundos)</b>	<b>30.51</b>	<b>20.96</b>	<b>21.00</b>	<b>13.82</b>
<b>fila média (veículos)</b>	<b>5.88</b>	<b>4.05</b>	<b>4.06</b>	<b>2.87</b>
<b>fila máxima (veículos)</b>	<b>32</b>	<b>34</b>	<b>34</b>	<b>20</b>

**Tabela 5.6: Comparação das Medidas de Desempenho**

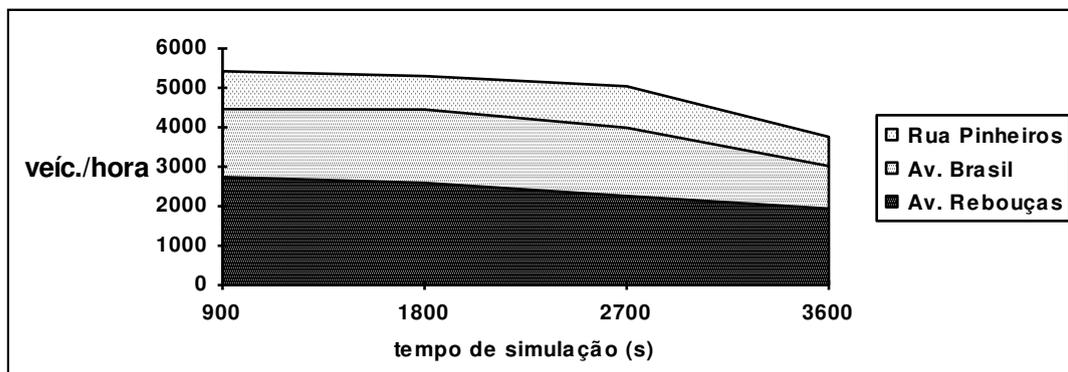


**Figura 5.8.a: Variação da Fila durante o Período de Simulação**



**Figura 5.8.b: Variação do Limite Superior de Extensões em Função da Fila**

- **Período 4**



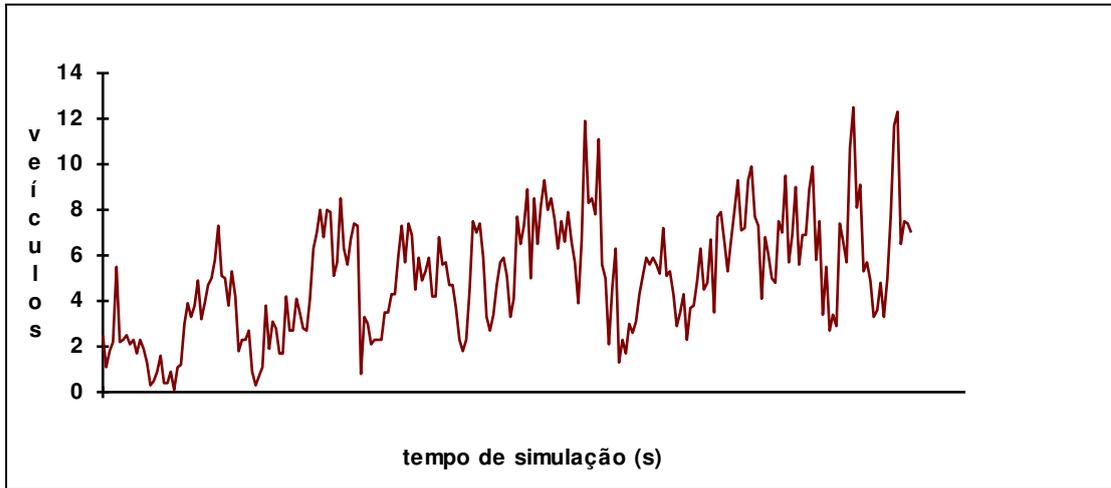
**Figura 5.9: Fluxo para Período 4**

	Fase A (s)	Fase B (s)	Fase C (s)
<b>Plano 1</b>	<b>113</b>	<b>7</b>	<b>30</b>
<b>Plano 2</b>	<b>152</b>	<b>7</b>	<b>41</b>
<b>Plano 3</b>	<b>81</b>	<b>7</b>	<b>32</b>
<b>Plano 4</b>	<b>67</b>	<b>7</b>	<b>16</b>

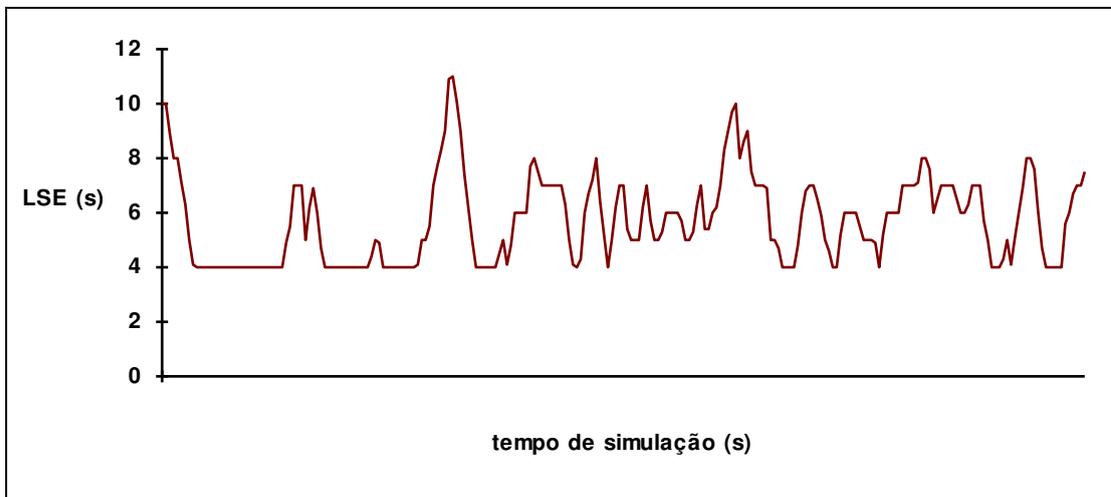
**Tabela 5.7: Planos de controle para período 4**

----- Controle ----- Medida -----	Plano Fixo	Nebuloso sem Adaptação	Nebuloso com Adaptação Estatística	Nebuloso com Adaptação Nebulosa
<b>atraso médio (segundos)</b>	<b>30.16</b>	<b>10.55</b>	<b>10.77</b>	<b>12.79</b>
<b>fila média (veículos)</b>	<b>5.30</b>	<b>1.85</b>	<b>1.89</b>	<b>2.25</b>
<b>fila máxima (veículos)</b>	<b>33</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>14</b>

**Tabela 5.8: Comparação das Medidas de Desempenho**



**Figura 5.10.a: Variação da Fila durante o Período de Simulação**



**Figura 5.10.b: Variação do Limite Superior de Extensões em Função da Fila**

Os testes foram realizados a fim de validar a estratégia de controle desenvolvida e também compará-la com a que existe hoje em funcionamento nas ruas.

Pelos gráficos e tabelas é possível constatar que a estratégia baseada em lógica nebulosa exhibe um desempenho melhor do que a baseada em planos fixos. Considera-se como parâmetros de medida atraso médio, fila média e fila máxima. Os resultados também mostram que o uso de estratégias de adaptação podem contribuir

efetivamente para o aumento do desempenho, uma vez que os atrasos e as filas são em média, menor que aquele obtido por qualquer uma das outras anteriores, .

Como era de se esperar a adaptação estatística funcionou bem com baixas densidades de fluxo (Período 1). Com altas densidades, ela não aparece, a não ser por mínimas diferenças. Isto porque, como dito anteriormente, a adaptação estatística é feita para os antecedentes das regras de controle e estas variáveis estão diretamente ligadas aos sensores que têm capacidade limitada pela distância entre eles e o cruzamento.

A adaptação via lógica nebulosa apresenta na maioria dos casos (Períodos 1, 3 e 4) filas máximas que se formam em fase de vermelho, menores que as obtidas pelo controlador sob estratégia de planos fixos e pelo controlador nebuloso sem adaptação. Para o Período 3, a melhora também acontece para o atraso médio. Estes períodos abrangem diversos perfis de tráfego. O Período 1 mostra-se, inicialmente, com baixa densidade de tráfego, a qual vai aumentando uniformemente para todas as vias, até chegar a uma densidade alta. O Período 3 apresenta densidade alta com pequenas variações, sendo que estas também são uniformes entre as vias. O Período 4 se inicia com alta densidade, a qual vai baixando de maneira uniforme e depois de estabiliza.

Para o Período 2, a adaptação via lógica nebulosa não supera o controlador sem adaptação, porém a perda é de apenas 5,85 % o que é compensado nos outros exemplos. O perfil de tráfego para este período é de alta densidade de fluxo, sendo que existem variações adversas entre as vias concorrentes.

Se as densidades de fluxo dos períodos 2 e 3 forem verificadas com bastante cuidado, ver-se-á que estas se mantêm quase constantes, ao longo do período de simulação. Esta é uma situação rara em trânsito. Tal efeito pode ser atribuído ao fato de se trabalhar com médias para simulação do número de veículos que passam pelo cruzamento.

Para mostrar melhor o desempenho das estratégias de adaptação, simulou-se um período com diversas variações na densidade de fluxo. A seguir tem-se o conjunto de resultados para esta simulação que não possui planos fixos, pois trata-se de densidades fictícias, com o objetivo de comparar apenas a nova estratégia desenvolvida, com e sem adaptações.

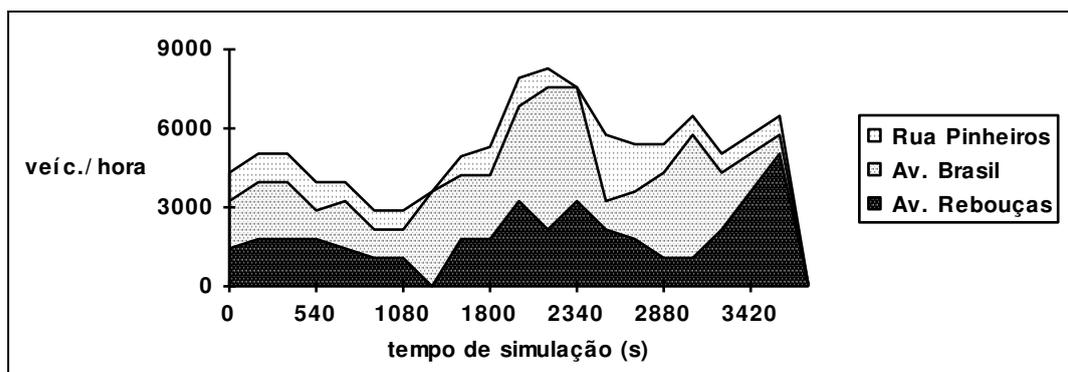
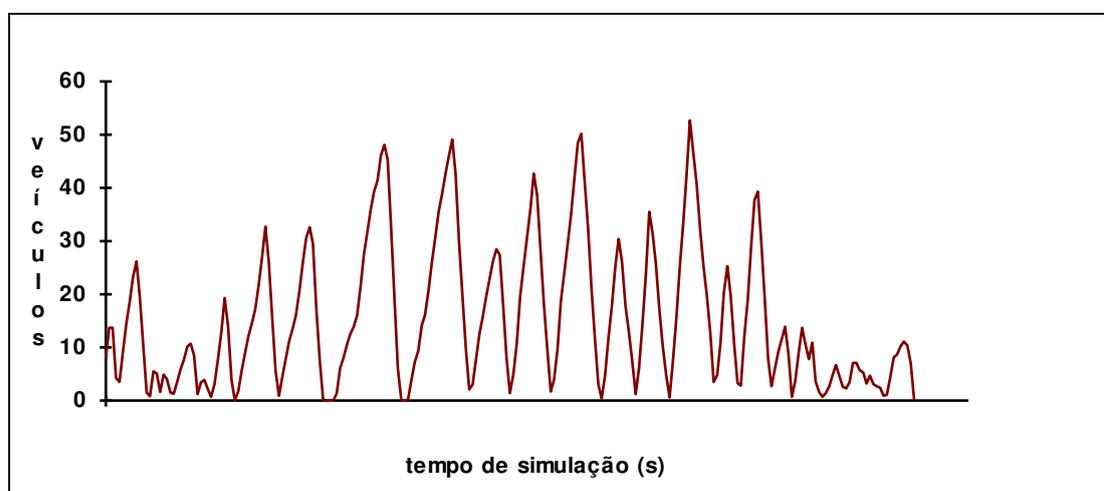


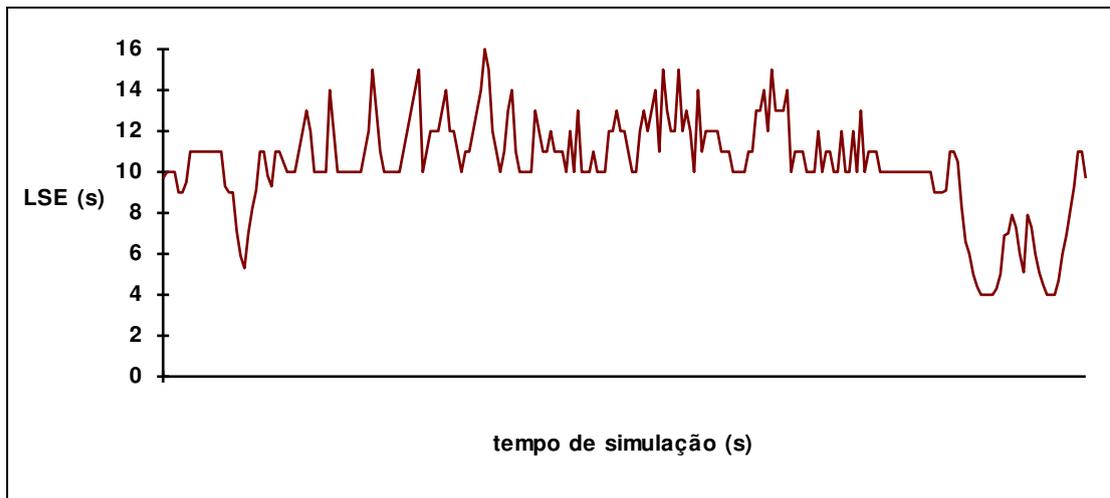
Figura 5.11: Fluxo para Período Variado

----- Controle ----- Medida -----	Nebuloso sem Adaptação	Nebuloso com Adaptação Estatística	Nebuloso com Adaptação Nebulosa
atraso médio (segundos)	31.29	31.45	20.15
fila média (veículos)	6.07	6.10	3.91
fila máxima (veículos)	72	72	58

**Tabela 5.9: Comparação das Medidas de Desempenho**



**Figura 5.12.a: Variação da Fila durante o Período de Simulação**



**Figura 5.12.b: Variação do Limite Superior de Extensões em Função da Fila**

Os resultados mostram que o controle baseado em lógica nebulosa oferece melhor desempenho com a estratégia de adaptação também nebulosa. Isto pode ser constatado, observando-se tanto os atrasos e filas médios quanto as filas máximas que se formam.

O perfil de tráfego utilizado é um perfil bastante abrangente que contém diversas situações de trânsito que podem ocorrer durante um dia. Ocorre diminuição de tráfego numa via enquanto o conjunto todo oferece aumento, sendo que o contrário também ocorre. Existem situações em que todo o conjunto apresenta o mesmo tipo de variação, sendo que aumento e diminuição foram observados.

De uma maneira geral, a estratégia desenvolvida apresenta melhor desempenho quando comparada as estratégias utilizadas hoje, se considerarmos filas e atrasos como parâmetros.

## 5.4. Resumo

Neste capítulo constatou-se a viabilidade de implementação de uma estratégia de controle de tráfego de junções complexas, baseada em lógica nebulosa, visando o controle de tráfego urbano.

Demonstrou-se, através das simulações, que as estratégias desenvolvidas neste trabalho apresentam desempenho superior quando comparadas com as estratégias em uso, considerando como parâmetros atraso e filas.

Além disso, verificou-se que as estratégias de adaptação contribuem para melhorar este desempenho para diversos perfis de tráfego, especialmente aqueles que possuem grande variação de densidades de fluxo de tráfego.

## 6. CONCLUSÕES e PERSPECTIVAS

### 6.1. Conclusões

Trabalhos anteriores mostram que o esquema de controle nebuloso fornece uma ferramenta poderosa para o tratamento de problemas que envolvem informações imprecisas.

Apresentou-se aqui, um sistema para controle de tráfego urbano, desenvolvido baseando-se na lógica nebulosa. Novas regras e vários métodos de *defuzzificação* foram implementados através de um simulador de cruzamentos que também foi desenvolvido. A inovação se deu no fato das regras levarem em consideração somente as condições de tráfego no instante da tomada de decisão, sem se importar com o tempo decorrido, ou período do dia.

Depois de um cuidadoso ajuste para estas regras, para os critérios de tomada de decisão e para os métodos de *defuzzificação*, implementou-se uma máquina de estado que permitiu o controle de cruzamentos mais complexos, com maior número de fases, pois existe um limite máximo para o tempo de espera em filas, determinado experimentalmente e, além disso, existem várias situações que podem ser otimizadas, como por exemplo, a existência de filas vazias para uma determinada fase. Todos estes casos são tratados pela máquina, antes de acionar todo o controle nebuloso.

A partir daí, visando uma maior eficiência do sistema de controle, estratégias de adaptação foram estudadas. Uma, utilizando a estatística do volume de tráfego no cruzamento durante um pequeno intervalo de tempo, outra, utilizando lógica nebulosa, para a qual foram desenvolvidas regras que levam em consideração as filas residuais e suas respectivas variações, e a estratégia de *defuzzificação* utilizada anteriormente.

Foi considerado também um caso, onde simulou-se o cruzamento das Avenidas Rebouças e Brasil mais a confluência da Rua Pinheiros na cidade de São Paulo, com dados cedidos pela CET. Este cruzamento foi escolhido pois é de grande importância à malha viária urbana da cidade e possui tráfego intenso em vários períodos do dia.

As simulações realizadas mostram a superioridade do controle nebuloso com relação ao existente no local, baseado em planos de tempo fixo que se alternam durante o dia.

Além disso, as estratégias de adaptação se mostraram eficientes melhorando ainda mais o sistema de controle desenvolvido. Os resultados obtidos mostraram que a estratégia de adaptação estatística é eficiente para baixos volumes de tráfego, enquanto que a nebulosa funciona para qualquer situação, diminuindo quando não o atraso médio sofrido pelos veículos, a fila máxima acumulada durante as fases de vermelho.

## 6.2. Perspectivas Futuras

Como as situações de tráfego que podem ocorrer num cruzamento variam durante o dia de maneira aleatória, seria interessante que trabalhos futuros dessem ênfase à aprendizagem de padrões de tráfego, o que pode ser incorporado ao controlador nebuloso proposto, visando uma maior rapidez e eficiência nas respostas a estas variações.

Esta aprendizagem poderia ser desenvolvida através de redes neurais, já que a simbiose entre esta ferramenta e lógica nebulosa apresenta-se como uma área bastante promissora.

Uma vez completo o sistema para um único cruzamento, é possível pensar na expansão do controlador para uma rede, sendo que existem vários tipos: desde a que envolve um corredor principal (avenida) e várias ruas secundárias (travessas), até aquelas que possuem uma malha de avenidas que se cruzam. Sendo que cada uma delas se constitui num padrão diferente de tráfego.

# BIBLIOGRAFIA

- [01] M. WOHL & B.V. MARTIN, *Traffic Systems Analysis for Engineers and Planners*, McGraw Hill Book Company, 1967.
- [02] F.V. WEBSTER, "Traffic Signal Settings", *Road Research Technical Paper 39*, RRL, London, 1958.
- [03] A.J. AL-KHALILI, "Urban Traffic Control - A General Approach", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol SMC-15, nº 2, March/April 1985.
- [04] M.D. MESAROVIC, D. MACKO, e V. TAKAHARA, *Theory of Hierarchical Multilevel System*, New York: Academic, 1970
- [05] K.L. BANG, "Optimal control of isolated traffic signals", *Traffic Engineering & Control*, 17, 288-292.
- [06] A.J. MILLER, "Settings for fixed-cycle traffic signals", *Op. Res. Q.*, 14(4), 1963, 373-386.
- [07] —, "A computer control system for traffic networks", *Proc., 2nd. Int. Symp. on the theory of traffic flow*, London, 1963.
- [08] C.J. BARNARD and I.S. SHAW, "Adaptive control of a traffic intersection by means of a neural network", *Proc of the IFAC SICICA - 92*, 793-798, Malaga - Spain, May - 1992.
- [09] E. CANUTO and A. VILLA, "On Planning Dissaturation Control Signals for Urban Areas", *Transp. Res. B*, vol 17 B, nº 1 pp 45-54, 1984.
- [10] L.A. ZADEH, "Fuzzy Sets", *Inform. Contr.*, vol 8, pp. 338-353, 1965
- [11] E.H. MAMDANI, "Applications of fuzzy algorithms for the control of dynamical plant", *Proc. IEE*, vol 121, nº 12, pp. 1585-1588, 1974.
- [12] P.J. KING and E.H. MAMDANI, "The application of fuzzy control systems to industrial process", *Round Table on Fuzzy Automata and Decision Process. Proc. sixth Triennial IFAC World Congress*, Cambridge/Boston, MA, August 24-30, 1975.
- [13] C.P. PAPPIS and E.H. MAMDANI, "A Fuzzy Logic Controller for a Traffic Junction", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol SMC-7, nº 10, pp. 707-717, Oct. 1977.
- [14] C.Y. NGO and V.O.K. LI, "Freeway Traffic Control using Fuzzy Logic Controllers", *4th IFSA World Congress*, Bruxelles, Bélgica, 1991.

- [15] B. KOSKO, "Fuzzy systems as universal aproximators", *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, pp 1153 - 1162, May 1992.
- [16] L.X. WANG, "Fuzzy Systems are universal aproximators", *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*, San Diego, pp 1163 - 1170, May 1992.
- [17] D. MAHALEL, "Manual versus Automatic Operation of Traffic Signals", *Transp. Res - A*, Vol 25A, nº 2/3, pp121-127, 1991.
- [18] C.C. LEE, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol SMC-20, nº 2, March/April 1990.
- [19] C.C. LEE, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part II", *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol SMC-20, nº 2,
- [20] W. PEDRYCZ, *Fuzzy Control and Fuzzy Systems*, Research Studies Press, Ltda, New York, 1989.
- [21] J. FAVILLA, A. MACHION, F. GOMIDE, R. GUDWIN, "Adaptive Fuzzy Controllers for Traffic Control", (submetida), 1992.
- [22] H.E. GAULT, "An on-line measure of delay in road traffic computer controlled systems", *Traffic Engineering & Control*, pp 384-389, July 1981.
- [23] D.J. ROBERTSON, "Traffic Models and Optimum Strategies of Control: A Review", *Proc. Int. Symposium Traffic Control Systems*, University of California, vol. 1, pp 262-288, 1979.
- [24] J. FAVILLA, A. MACHION, F. GOMIDE, R. GUDWIN, "Adaptive Fuzzy Logic-Based Urban Traffic Control", *Third Annual IAKE Symposium*, November 16-19, Washington, 1992.
- [25] P.G. HOEL, *Introduction to Mathematical Statistics*, 4 ed., New York, Wiley, 1971.
- [26] P.F. HULDQUIST, "A good random number generator for computers", *Simulation* 57:4, pp 258-259, 1991.
- [27] F.V. WEBSTER and B.M. COBBE, "Traffic Signals", *Technical Paper 56*, Road Research Laboratory, 1966.
- [28] J. FAVILLA, A. MACHION, F. GOMIDE, "Fuzzy Traffic Control: Adaptive Strategies", *Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 28/03 - 01/04, San Francisco, Califórnia, EUA, 1993.